Palmira Pečiuliauskienė, Alfonsas Rimeika

Fizika



Palmira Pečiuliauskienė, Alfonsas Rimeika

Fizika

Išplėstinis kursas



ŠVIESA KAUNAS

UDK 53(075.3)
Pe23

Redaktorė ZITA ŠLIAVAITĖ

Dailininkė VYTAUTĖ ZOVIENĖ

Lietuvos Respublikos švietimo ir mokslo ministerijos rekomenduota 2009 03 24, Nr. 42

Vadovėlis atitinka kalbos taisyklingumo reikalavimus

Pirmasis leidimas 2009

ISBN 978-5-430-05444-1

Turinys

OPTIKA

7. Geometrinė optika (Palmira Pečiuliauskienė)

8. Banginė optika (Alfonsas Rimeika)

9. Kvantinė optika (Alfonsas Rimeika)

ATOMO FIZIKA

10. Atomo ir branduolio fizika
(10.1–10.10 Alfonsas Rimeika, 10.11–10.15 Palmira Pečiuliauskienė)

Mielieji mokiniai!

Džiaugiamės, kad pasirinkote išplėstinį fizikos kursą. Jį išmokti padės šis vadovėlis, kurį sudaro dvi knygos. Abiejų knygų mokomoji medžiaga suskirstyta į keturias dalis: „Elektrą“, „Optiką“, „Atomo fiziką“ ir „Astronomiją“. Kiekviena jų dar skirstoma į skyrius, šie – į temas, o temos – į potemius. Antroji knyga apima „Optiką, „Atomo fiziką“ ir „Astronomiją“.

Kiekvienas vadovėlio skyrius pradedamas trumpa jo anotacija ir baigiamas apibendrinimu, t. y. santrauka, kurioje pateikiamos svarbiausios sąvokos, dėsniai, schemos, palyginamosios lentelės, formulės. Ji padės rengiantis savarankiškam ar kontroliniam darbui, taip pat fizikos egzaminui.

Temų pradžioje išvardijamos pagrindinės fizikos sąvokos, kurias turite mokėti išėję temą, toliau potemiais dėstoma nauja mokomoji medžiaga. Potemių pavadinimai yra tarsi savotiškas struktūrinis temos planas. Temų pabaigoje pateikiama klausimų ir užduočių, padedančių įtvirtinti mokomąją medžiagą.

Paskutinė kiekvieno skyriaus tema yra pažintinė ir neprivaloma. Joje pateikta informacija papildo skyriaus medžiagą, susieja ją su praktine patirtimi, artimiausioje aplinkoje vykstančiais reiškiniais, mokslo ir technikos pažanga, praktinėje veikloje kylančiomis ekologinėmis problemomis.

Pagrindinės sąvokos, apibrėžimai ir dėsniai, kuriuos reikia išmokti, vadovėlyje išspausdinti pastorintu pasviru šriftu. Jų nereikia mokytis formuluoti pažodžiui, bet galima aiškinti savais žodžiais. Svarbu perteikti esmę, jos neiškraipyti. Svarbiausios formulės ir matematinės dėsnių išraiškos vadovėlyje išskirtos spalviniu fonu.

Sunkesnės temos papildytos skyreliais „Mokomės spręsti uždavinius“. Remdamiesi juose pateiktais uždavinių sprendimo pavyzdžiais, galėsite sėkmingai atlikti tų skyrelių pabaigoje esančias užduotis savarankiškam darbui. Jų ir kitų užduočių atsakymai pateikti šalia mažesniu šriftu. Sudėtingesni uždaviniai pažymėti simboliu *.

Vadovėlyje gausu įvairių iliustracijų: piešinių, nuotraukų, schemų, grafikų. Jos papildo tekstinę medžiagą ir padeda lengviau perprasti nagrinėjamą temą.

Įsidėmėję šiuos vadovėlio struktūros ir mokomosios medžiagos pateikimo ypatumus, galėsite lengviau naudotis vadovėliu ir geriau perprasite mokomąją medžiagą.

Sėkmingo darbo!


O p t i k a

7 Geometrinė optika

Šiame skyriuje nagrinėsite geometrinės optikos dėsnius: tiesiaeigio šviesos sklidimo, atspindžio, lūžimo, visiškojo atspindžio. Prisiminsite, ką žinote apie lęšius, mokysitės braižyti jais gaunamus atvaizdus, nagrinėsite paprasčiausių optinių prietaisų: lupos, akies, akinių – veikimą.

7.1. Tiesiaeigis šviesos sklidimas

Pagrindinės sąvokos

Òptika,
òptiniai reiškiniaĩ,
geomètrinė òptika,
šviesõs spindulỹs,
bangõs fròntas,
tiesiaeĩgis šviesõs sklidìmas,
šešélis,
pùsšešėlis.

Šviesos spindulys – viena iš geometrinės optikos sąvokų

Šviesa atlieka ypatingą vaidmenį mūsų Žemėje. Ji palaiko gyvybę, teikia informacijos. Apie 92 % visos informacijos žmogus gauna būtent iš šviesos. ***Fizikos mokslo dalis, nagrinėjanti šviesos reiškinius, vadinama òptika*** (gr. *optikē* – regėjimo mokslas), o patys šviesos reiškiniai – *òptiniais reiškiniaĩs.*

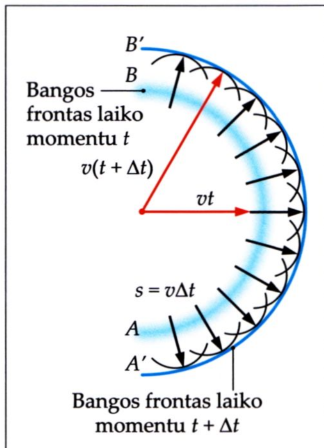
Krintanti į daiktus šviesa įgalina juos matyti, orientuotis erdvėje. Šviesai būdinga dar viena svarbi savybė – šviesa turi energijos ir perneša ją erdvėje. Apskaičiuota, kad per 1 s iš Saulės į Žemę patenka tiek energijos, kiek jos išsiskiria sudeginus 40 mln. t anglių. Energiją gali pernešti arba judantys kūnai, arba bangos, todėl yra dvi hipotezės apie šviesos prigimtį. Viena jų teigia, kad šviesa yra dalelės, kita – kad bangos. Plačiau apie šviesos prigimtį sužinosite kituose dviejuose vadovėlio skyriuose „Banginė optika" ir „Kvantinė optika".

Daugelį šviesos reiškinių galima paaiškinti remiantis šviesos spindulių vaizdiniais ir nesigilinant į šviesos prigimtį. ***Optikos skyrius, kuris šviesos energijos sklidimo skaidriomis terpėmis dėsnius nagrinėja remdamasis šviesos spindulio sąvoka, vadinamas geomètrine òptika.*** Šviesos spindulio sąvoka vartojama ne tik geometrinėje optikoje, bet ir buityje. Čia ji asocijuojasi su šiluma, šviesos pluoštu dūmų ar dulkelių pilname kambaryje ar ore (7.1.1 pav.). Panašią šviesos spindulio prasmę įžvelgiame ir literatūroje. Geometrinėje optikoje šviesos spindulio prasmė yra kiek kitokia. Tai ne realiai egzistuojantis darinys, o abstrakti linija. ***Šviesõs spiñduliu vadinamas ne siauras šviesos pluoštas, bet linija, kuria sklinda šviesos energija.*** Taigi spinduliai rodo šviesos energijos sklidimo kryptį. Norėdami ją nustatyti, išskiriame siaurus šviesos pluoštus, kurių skersmuo didesnis už bangos ilgį, ir pakeičiame juos linijomis. Jos yra tarsi tų pluoštų ašys. Šviesos spindulio sąvoka reikalinga šviesos sklidimo dėsningumams erdvėje apibūdinti.

7.1.1 pav.



Šviesos spindulį galima apibrėžti ir kitaip. Šviesa iš mažo šaltinio sklinda visomis kryptimis vienodai (7.1.2 pav.). Geometrinė vieta taškų, kuriuos pasiekia bangavimas, vadinama ***bangõs frõntu***. Mažo šaltinio skleidžiamos šviesos bangos frontas yra rutulys. 1678 m. olandų fizikas Kristianas Heigensas (*Christian Huygens*) suformulavo principą, apibūdinantį tiek mechaninių, tiek šviesos bangų sklidimą. Jis vadinamas Heigenso principu: kiekvienas bangos fronto taškas yra antrinių bangų, sklindančių visomis kryptimis bangos sklidimo greičiu, šaltinis. Žinant bangos frontą laiko momentu t, galima nustatyti, koks jis bus praėjus laiko tarpui Δt. Tas frontas bus antrinių bangų, sklindančių nuo kiekvieno bangos fronto AB taško, gaubtìnė (žr. 7.1.2 pav.). Rodyklės paveiksle žymi, kuria kryptimi kiekviename taške sklinda bangos frontas. Kadangi jų kryptys statmenos bangos frontui, tai spindulys yra vektorius, statmenas bangos frontui ir rodantis bangos energijos pernešimo kryptį konkrečiame taške.

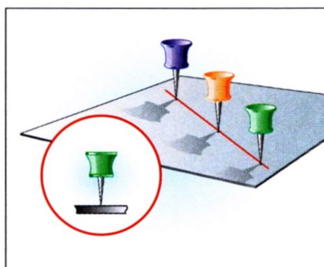


7.1.2 pav.

Remdamiesi šviesos spindulio sąvoka, aptarkime šviesos sklidimą vienalyte terpe.

Tiesiaeigio šviesos sklidimo dėsnis

Oras – mus supanti vienalytė terpė. Įrodykime, kad šviesa ja sklinda tiesiai. Tam pakanka turėti gerą liniuotę ir keletą smeigtukų. Popieriaus lape nubrėžkime bet kokio ilgio tiesės atkarpą, jos galuose ir per vidurį įsmeikime po smeigtuką ir pažiūrėkime išilgai nubrėžtos atkarpos (7.1.3 pav.). Jeigu ji tiesi, žiūrėdami iš galo, matysime tik pirmąjį smeigtuką – kitus jis užstos. Nuo antrojo smeigtuko tiesiai sklindanti šviesa į akis nepatenka, mat sutinka neskaidrią kliūtį (pirmąjį smeigtuką). Šis ir kiti bandymai rodo, kad ***vienalyte terpe šviesa sklinda tiesiai***.

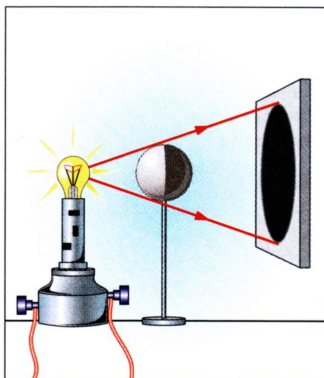


7.1.3 pav.

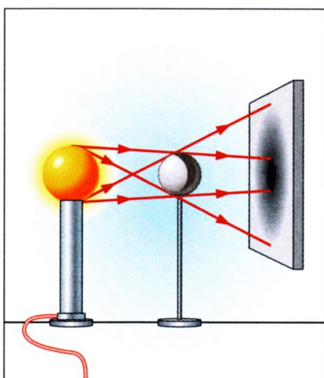
Tiesiaeigio šviesos sklidimo dėsnis buvo pastebėtas daugiau kaip prieš du tūkstančius metų. Praktiniams tikslams jį taikė jau senovės graikai, tikrindami, ar statomos kolonos yra vienoje tiesėje.

Šešėlių ir pusšešėlių susidarymas

Tiesiaeigiu šviesos sklidimu aiškinamas šešėlių ir pusšešėlių susidarymas. ***Šešéliu*** vadinama erdvės sritis, į kurią nepatenka šviesos energija. Mažų švie-



7.1.4 pav.



7.1.5 pav.

čiančių kūnų metami šešėliai turi labai ryškius kontūrus (7.1.4 pav.). Būdama šešėlyje, akis nemato šviesos šaltinio.

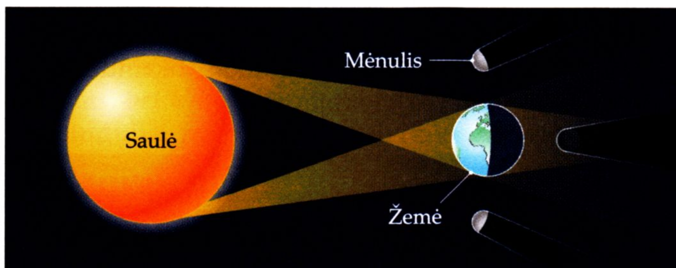
Erdvės sritis, į kurią patenka dalis šviesos šaltinio energijos, vadinama ***pùsšešėliu***. Ji yra šviesesnė už šešėlį. Pusšešėlis susidaro tada, kai šaltinio matmenys yra dideli (7.1.5 pav.). Iš tokio šaltinio kiekvieno taško šviesa sklinda tiesiai. Jau du taškai gali sukurti nesutampančius šešėlius. Šie užkloja vienas kitą, ir ekrane susidaro nevienodo šviesumo šešėlis. Iš pusšešėlio matoma dalis šviesos šaltinio.

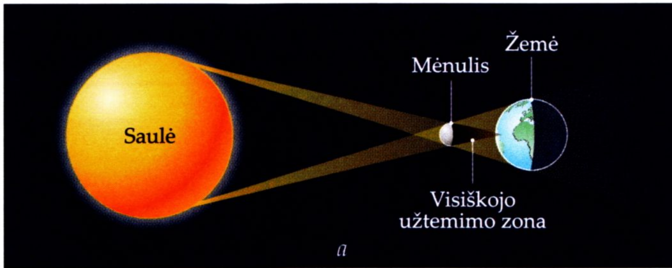
Saulės ir Mėnulio užtemimai

Saulės ir Mėnulio užtemimus paaiškina tiesiaeigio šviesos sklidimo dėsnis. Kai visas Mėnulis (arba jo dalis) patenka į Žemės šešėlį, įvyksta vìsiškasis (7.1.6 pav.) (arba dalìnis) Mėnùlio užtemìmas. Tuo pačiu metu iš Žemės jis matomas visur, kur Mėnulis yra užtekėjęs. Mėnulio užtemimai vyksta tik per pilnatį. Vieną nuo kito juos skiria beveik pusės metų laikotarpis.

Vìsiškasis Sáulės užtemìmas vyksta ten, kur ant Žemės krinta Mėnulio šešėlis (7.1.7 pav., *a*). Jo skersmens ilgis siekia apie 250 km, todėl Saulės užtemimą galima matyti tik nedideliame Žemės plote. Mėnuliui skriejant savo orbita, jo šešėlis slenka Žeme iš vakarų į rytus, brėždamas visiškojo Saulės užtemimo juostą (7.1.8 pav.). Iš užtemimo vietos Saulės disko nematome, regime tik jos chromosferos žiedą ir vainiką (7.1.7 pav., *b*). Toje pačioje vietoje visiškasis Saulės užtemimas matomas kartą per 200–300 metų. Dalìnis Sáulės užtemìmas vyksta ten, kur ant Žemės krinta Mėnulio pusšešėlis. Iš jo matoma dalis Saulės disko (7.1.7 pav., *c*).

7.1.6 pav.



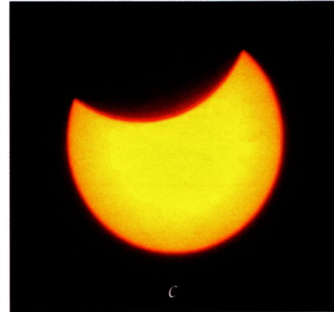




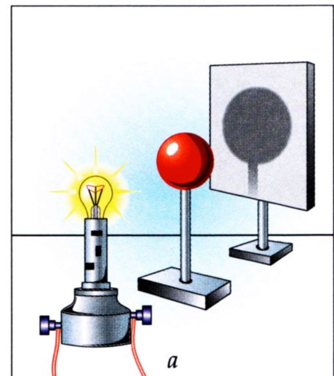
7.1.7 pav.

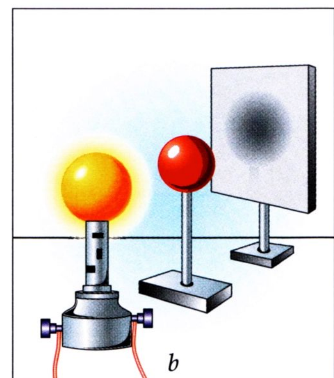


7.1.8 pav.



7.1.9 pav.





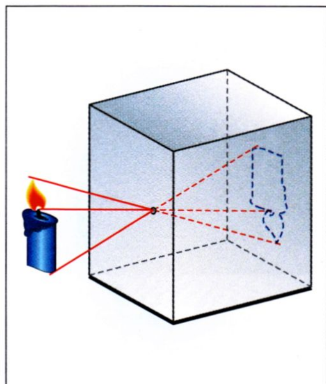
Klausimai ir užduotys

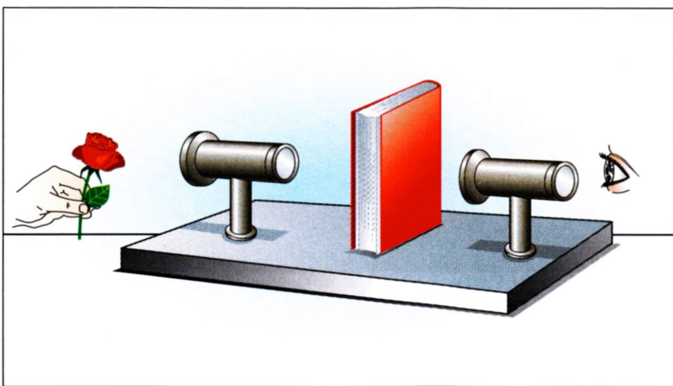
1. 7.1.9 paveiksle pavaizduoti du bandymai. Kodėl vienu atveju (*a*) ekrane susidaro rutuliuko šešėlis, o kitu atveju (*b*) – šešėlis ir pusšešėlis? Atsakymą papildykite brėžiniu.

2. Kokį reiškinį mato kosmonautas, būdamas Mėnulyje:
a) jo užtemimo metu;
b) visiškojo Saulės užtemimo metu?

3. Šviesos šaltinio skersmens ilgis 10 cm, o atstumas iki ekrano 1 m. 4 cm skersmens sviedinukas padėtas tarp šaltinio ir ekrano taip, kad ekrane susidaro tik jo pusšešėlis. Tiesė, einanti per šviesos šaltinio ir sviedinuko centrus, statmena ekrano plokštumai.
a) Nubraižykite atitinkamą brėžinį.
b) Apskaičiuokite sviedinuko atstumą iki ekrano.

(0,4 m)


7.1.10 pav.


7.1.11 pav.

4. Išmatavę savo ūgį (jeigu jo nežinote) ir šešėlio ilgį, apskaičiuokite kampinį Saulės aukštį virš horizonto.

5. Siauras šviesos pluoštas krinta į degtukų dėžutės šoninėje sienelėje esančią angą ir išeina pro angą priešingoje sienelėje. Ar būtų galima matyti šį šviesos pluoštą, žiūrint pro angą priekinėje dėžutės sienelėje, kai oras dėžutėje švarus? Atsakymą pagrįskite.

6. Viduramžiais naudotas optinis įtaisas, vadinamas kamera obskura (7.1.10 pav.). Ją sudaro tamsi dėžė, kurios vienoje sienoje pradurta maža skylutė. Šviesos spinduliai, atsispindėję nuo daiktų, esančių priešais skylutę, patenka į kamerą ir priešingoje jos sienoje sukuria apverstus daiktų atvaizdus. Žinomas italų dailininkas, architektas ir mokslininkas Leonardas da Vinčis (*Leonardo da Vinci*) viename savo rankraštyje teisingai paaiškino kameros obskuros veikimą. Kaip jį paaiškintumėte jūs? Kaip kistų daikto atvaizdas, didinant skylutę?

7. Ant stalo vertikaliai pastatytas 12 cm ilgio pieštukas meta 8 cm ilgio šešėlį. Atstumas nuo pieštuko pagrindo iki statmens, nuleisto iš lempos centro į stalo paviršių, pagrindo lygus 72 cm. Kokiame aukštyje virš stalo kabo lempa? Tarkite, kad lempa yra labai mažas šviesos šaltinis. (1,2 m)

8*. Prie vieno vamzdelio galo priartinta gėlė, o tarp tuščiavidurių vamzdelių pastatyta knyga (7.1.11 pav.). Vis dėlto pro kito vamzdelio galą gėlė yra matoma. Paaiškinkite, kodėl knyga jos neužstoja. Atsakymą papildykite brėžiniu.

7.2. Šviesos atspindys

Pagrindinės sąvokos

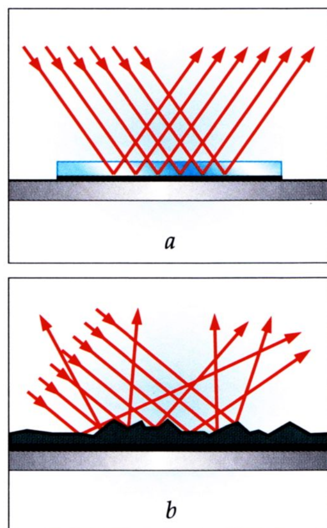
Krintantỹsis spindulỹs, atsispindė́jęs spindulỹs, kritìmo kam̃pas, ãtspindžio kam̃pas, veidrodìnis atspindỹs, sklaidùsis atspindỹs, spindulių̃ eigõs apgręžiamùmas, menamàsis ãtvaizdas.

Šviesos atspindys. Šviesos atspindžio rūšys

Tiesiai sklisdama vienalyte terpe, šviesa savo kelyje dažnai sutinka neskaidrias kliūtis, nuo kurių atsispindi. Tačiau nuo kliūties atsispindi ne visa šviesa, dalį jos kliūtis sugeria.

Žinome, kad šviesą gerai atspindi veidrodžiai. Idealiai lygų paviršių, puikiai atspindintį šviesą, vadiname veidrodiniù. Plokščias veidrodinis paviršius yra plokščiasis veidrodis. Lygiagretūs spinduliai, atsispindėję nuo jo, pakeičia sklidimo kryptį, bet išlieka lygiagretūs (7.2.1 pav., *a*). Tokį atspindį vadiname ***veidrodiniù ãtspindžiu***. Taip atsispindėti šviesa gali tada, kai paviršiaus nelygumai yra ne didesni už jos bangos ilgį. Stipraus šaltinio skleidžiama šviesa, atsispindėjusi nuo plokščiojo veidrodžio ir patekusi į akis, gali apakinti, sukelti skausmą.

Atsispindėjusi nuo nelygių, šiurkščių paviršių, pavyzdžiui, nuo kambario sienos ar baldų, ji tokių nemalonių pojūčių nesukelia. Lygiagretūs spinduliai, atsispindėję nuo nelygaus paviršiaus, sklinda įvairiomis kryptimis. Toks šviesos atspindys vadinamas ***sklaidžiúoju*** (***difùziniu***) ***ãtspindžiu*** (7.2.1 pav., *b*).



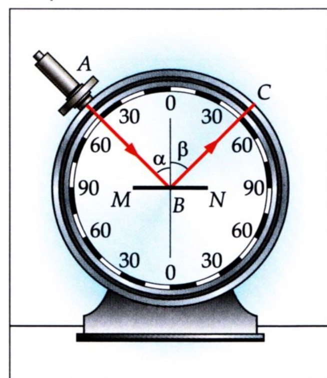
7.2.1 pav.

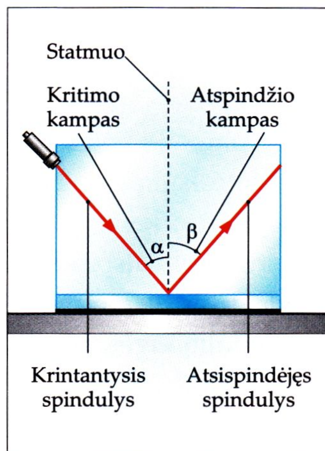
Šviesos atspindžio dėsnis

Šviesos atspindžio dėsnį dar III a. pr. Kr. nustatė senovės graikų mokslininkas Euklidas (*Eukleidēs*). Tą dėsnį nesunku patikrinti bandymais, naudojant optinį diską (7.2.2 pav.). Šviesos šaltinį *A* galima laisvai slankioti disko pakraščiu, kuriame pažymėtos padalos ir nurodytos atitinkamos kampų vertės laipsniais. Disko centre lygiagrečiai su horizontaliu skersmeniu įtvirtinamas šviesą atspindintis veidrodėlis *MN*. Nukreipus į jį šviesą, išmatuojamas kritimo kampas α ir atspindžio kampas β. Primename su šviesos atspindžiu susijusias svarbiausias sąvokas (žr. 7.2.3 pav.):

- ***kritìmo kampù*** α vadinamas kampas, kurį sudaro krintantysis spindulys ir per jo kritimo tašką nubrėžtas statmuo atspindinčiam paviršiui;

7.2.2 pav.





7.2.3 pav.

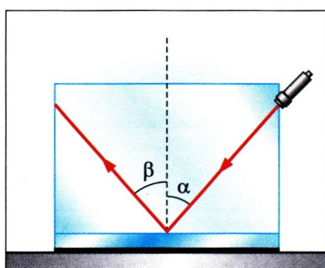
- *ãtspindžio kampù* β vadinamas kampas tarp šio statmens ir atsispindėjusio spindulio.

Keičiant optinio disko šviesos šaltinio padėtį, taigi ir šviesos kritimo kampą, ir drauge matuojant atspindžio kampą, galima įsitikinti, kad šviesa nuo paviršiaus atsispindi tokio pat dydžio kampu, kokiu krito.

Tiriant šviesos atspindį, svarbu nustatyti, kokioje plokštumoje yra atsispindėjęs spindulys. Bandymai su optiniu disku rodo, kad ir krintantysis (*AB*), ir atsispindėjęs (*BC*) spindulys yra disko plokštumoje. Bandymas patvirtina šviesos atspindžio dėsnį:

- ***krintantysis spindulys, atsispindėjęs spindulys ir per kritimo tašką nubrėžtas statmuo veidrodžio paviršiui yra vienoje plokštumoje;***
- ***atspindžio kampas lygus spindulio kritimo kampui:***

$$\beta = \alpha.$$



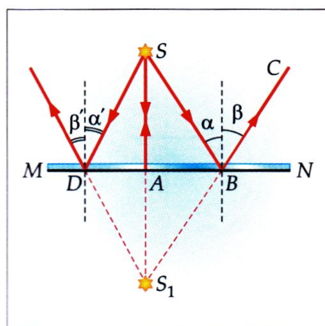
7.2.4 pav.

Šie teiginiai teisingi ir tada, kai šviesa sklinda atvirkščia kryptimi (7.2.4 pav.). Pakeitus spindulių sklidimo kryptį priešinga, atsispindėjęs spindulys sutampa su krintančiuoju, o krintantysis – su atsispindėjusiu. ***Spindulių̃ eigõs apgręžiamùmas*** yra svarbi šviesos savybė.

Atvaizdo susidarymas plokščiajame veidrodyje

Šviesos atspindžio dėsniu grindžiamas atvaizdų susidarymas plokščiajame veidrodyje. Tai žinote iš X klasės fizikos kurso, tačiau dar kartą prisiminkime, kaip braižomas atvaizdas plokščiajame veidrodyje. Tarkime, kad prieš veidrodį yra koks nors daiktas. 7.2.5 paveiksle pavaizduotas vienas jo taškas *S*. Akivaizdu, kad šviesa nuo jo atsispindi visomis kryptimis. Iš daugybės į veidrodžio paviršių *MN* krintančių spindulių pasirinkime spindulį *SA*, krintantį statmenai. Atsispindėjęs jis sklinda priešinga kryptimi *AS*. Imkime dar vieną spindulį, pavyzdžiui, *SB*, krintantį į veidrodį kampu α. Atsispindėjęs jis eina kryptimi *BC*. Pratęsę atsispindėjusius spindulius *AS* ir *BC* priešinga jų sklidimui kryptimi, randame sankirtos tašką S_1. Matematiškai nesunku įrodyti, kad taškai *S* ir S_1 yra simetriški veidrodžio *MN* atžvilgiu, t. y. nutolę nuo jo vienodai. Taškas S_1 yra menamasis taško *S* atvaizdas plokščiajame veidrodyje. ***Menamúoju*** vadi-

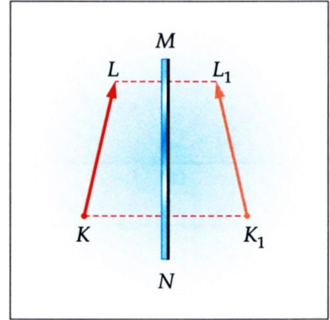
7.2.5 pav.



namas toks daikto atvaizdas, kurį sudaro ne patys spinduliai, bet jų tęsiniai. Šviesos energija į menamąjį atvaizdą nepatenka. Jeigu taške S_1 padėtume ekraną, jame šviesos šaltinio atvaizdas nesusidarytų. Vadinasi, atvaizdas S_1 yra tik regėjimo iliuzija. Apibendrinkime abi išvadas: ***plokščiasis veidrodis sudaro menamąjį šviečiančio taško S atvaizdą taške S_1, kuris yra simetriškas taškui S veidrodžio plokštumos atžvilgiu.***

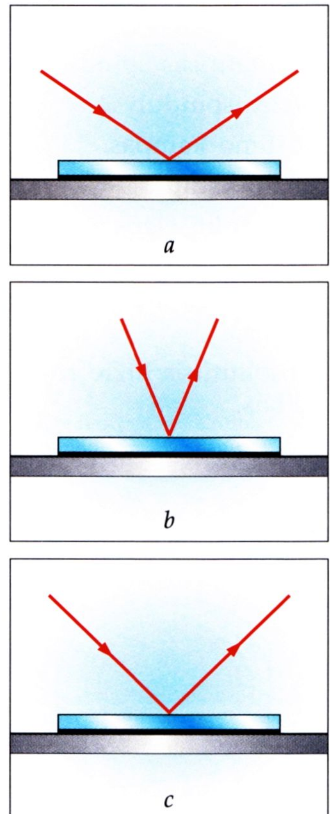
Sakykime, prieš veidrodį yra rodyklė *KL* (7.2.6 pav.). Norėdami rasti jos atvaizdą, iš kraštinių taškų *K* ir *L* nubrėžiame statmenis veidrodžio paviršiui *MN* ir pratęsiame juos už veidrodžio tokiu pat atstumu. Gauname taškus K_1 ir L_1. Sujungę juos atkarpa, turime rodyklės *KL* atvaizdą K_1L_1. Jis vadinamas veidrodiniù ãtvaizdu. Jam būdingos tokios savybės:

- jis yra menamasis,
- jis yra tokio pat dydžio kaip daiktas,
- atvaizdas ir daiktas yra simetriški veidrodžio paviršiaus atžvilgiu,
- daikto kairioji ir dešinioji pusės atvaizde susikeičia vietomis.



7.2.6 pav.

7.2.7 pav.



Klausimai ir užduotys

1. Kuriame paveiksle (7.2.7 pav.) kritimo kampas yra didžiausias, kuriame – mažiausias?

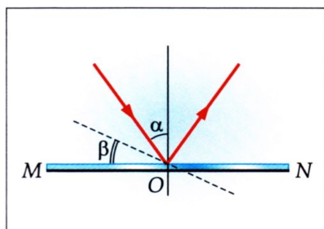
2. Kokiu kampu spindulys turi kristi į plokščiąjį veidrodį, kad kampas tarp krintančiojo ir atsispindėjusio spindulio būtų lygus 80°; 40°?

3. Veidrodis neiškraipo vaizdo, tačiau daiktas ir jo atvaizdas turi esminį skirtumą – jų kairioji ir dešinioji pusės susikeitusios vietomis. Paaiškinkite šį reiškinį.

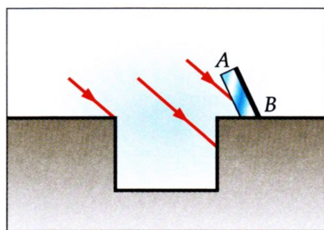
4. Žvakė buvo pastatyta 25 cm atstumu nuo veidrodžio. Koks atstumas bus tarp žvakės ir jos atvaizdo, kai žvakę pastumsime tolyn nuo veidrodžio 10 cm atstumu?

5. Naktį automobilio žibintų apšviesti vandens klanai ant asfalto vairuotojui atrodo kaip tamsios dėmės. Paaiškinkite šį reiškinį.

6. Prie plokščiojo veidrodžio paviršiaus bet kurioje jo vietoje priglaustas pirštas nesusiliečia su savo atvaizdu. Kaip paaiškinti tokį reiškinį?



7.2.8 pav.



7.2.9 pav.

7. Kaip reikia padėti plokščiąjį veidrodį, kad horizontaliai stalu riedančio rutuliuko atvaizdas jame kiltų vertikaliai aukštyn?

8. Plokščiasis veidrodis *MN* gali suktis apie horizontalią ašį *O* (7.2.8 pav.). Šviesos spindulys krinta į veidrodį kampu α. Kokiu kampu pasisuks atsispindėjęs spindulys, kai veidrodį pasuksime kampu β?

9. Saulės spinduliai krinta 40° kampu į horizontą (7.2.9 pav.). Kaip reikia padėti veidrodėlį *AB*, kad šie spinduliai patektų į duobės dugną? Pavaizduokite tai brėžiniu.

10*. Mažas šviesos šaltinis padėtas tarp dviejų plokščiųjų veidrodžių, sudarančių vienas su kitu 45° kampą. Brėždami raskite šaltinio atvaizdus abiejuose veidrodžiuose. Kiek jų susidarys? (7)

Pagrindinės sąvokos

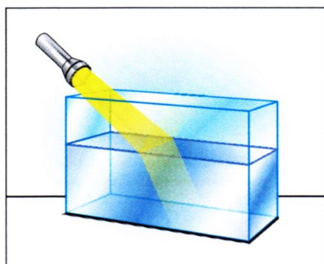
Šviesõs lūžìmas,
krintantỹsis spindulỹs,
lū̃žęs spindulỹs,
kritìmo kam̃pas,
lū̃žio kam̃pas,
spindulių̃ eigõs apgręžiamùmas,
santykìnis lū̃žio rodìklis,
absoliutùsis lū̃žio rodìklis.

7.3. Šviesos lūžimas

Šviesos lūžimo samprata

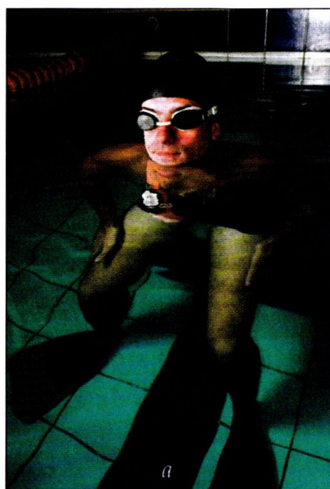
Žinome, kad nuo neskaidrios kliūties (namo sienos, paveikslo, veidrodžio, žmogaus ir pan.) šviesa atsispindi. Jei kliūtis skaidri (stiklas, vanduo, plastikas ir t. t.), nuo jos atsispindi tik maža dalis šviesos, kita pereina terpių ribą ir patenka į kitą terpę. Tuo galime įsitikinti atlikdami bandymus. Šviesos pluoštą nukreipę į dažyto vandens paviršių (7.3.1 pav.), matome, kad dalis šviesos nuo jo atsispindi, o dalis patenka į vandenį. Pereidama į vandenį, šviesa pakeičia sklidimo kryptį. ***Šviesos spindulio krypties pasikeitimas, kai jis pereina iš vienos skaidrios terpės į kitą, vadinamas šviesõs lūžimù.***

7.3.1 pav.



Mus supančioje aplinkoje šviesos lūžimą galima matyti gana dažnai. Dėl jo tariamai pakinta matomų daiktų matmenys, forma ir padėtis (7.3.2 pav.). Šviesos lūžimas sudaro mirgėjimo, blykčiojimo įspūdį – atrodo, kad oras karštą vasaros dieną mirga, žvaigždės naktį blykčioja.

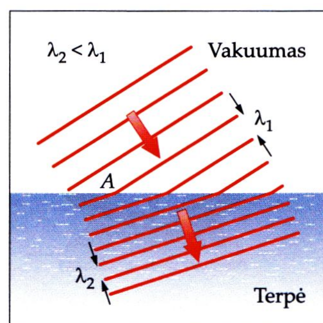
Kokia yra šviesos lūžimo prigimtis? Šviesos sklidimo kryptis pakinta dėl to, kad pasikeičia šviesos,





7.3.2 pav.

pereinančios iš vienos terpės į kitą (ne 90° kampu), greitis. Jam kintant, kinta šviesos bangos ilgis, bet ne dažnis. Kai bangos fronto kraštas *A* (7.3.3 pav.) patenka į kitą terpę, ta bangos dalis sulėtėja ($v < c$). Pirmoje terpėje likusi bangos fronto dalis juda tuo pačiu greičiu (c) ir pasiveja į kitą terpę perėjusią fronto dalį. Šį reiškinį apibūdina šviesos lūžimo dėsnis.



7.3.3 pav.

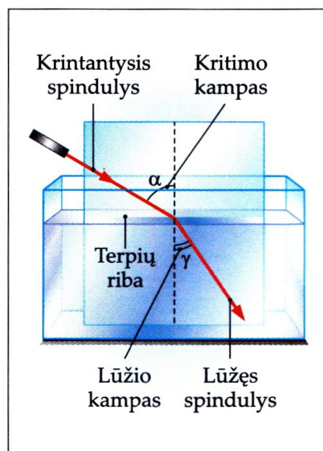
Šviesos lūžimo dėsnis

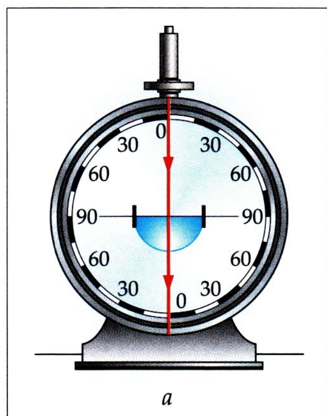
Norėdami suformuluoti šviesos lūžimo dėsnį, prisiminkime lūžimą apibūdinančias sąvokas (žr. 7.3.4 pav.):

- ***krintantỹsis spindulỹs*** – pirmojoje terpėje į dviejų terpių ribą krintantis spindulys;
- ***kritìmo kam̃pas*** – kampas tarp krintančiojo spindulio ir statmens, nubrėžto į terpių ribą per kritimo tašką;
- ***lū̃žęs spindulỹs*** – į antrąją terpę patekęs spindulys;
- ***lū̃žio kam̃pas*** – kampas tarp lūžusio spindulio ir statmens.

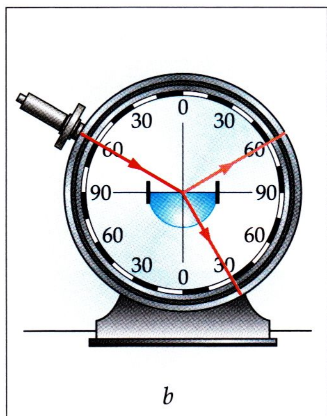
Šviesos lūžimo dėsnį galima iliustruoti optiniu disku (7.3.5 pav.). Jo centre reikia įtvirtinti iš storo stiklo išpjautą pusritinį. Spindulį nukreipę statmenai oro ir stiklo ribai, matysime, kad jis savo sklidimo krypties nepakeičia (7.3.5 pav., *a*). Vadinasi, sklisdama statmenai terpių ribai, šviesa nelūžta. Optiniu disku galima tirti spindulio kritimo kampo ir lūžio kampo pri-

7.3.4 pav.





a



b

7.3.5 pav.

klausomybę (7.3.5 pav., *b*). Bandymai rodo, kad, kritimo kampui didėjant, lūžio kampas taip pat didėja, tačiau ne tiesiogiai proporcingai kritimo kampui.

Šviesos lūžimo dėsnis nustatomas ne tik bandymais. Jį galima įrodyti geometriškai, remiantis Heigenso principu. Šviesos lūžimo dėsnis formuluojamas taip:

- ***krintantysis spindulys, lūžęs spindulys ir per kritimo tašką nubrėžtas statmuo terpes skiriančiam paviršiui yra vienoje plokštumoje;***
- ***kritimo kampo sinuso ir lūžio kampo sinuso santykis dviem terpėms yra pastovus dydis:***

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n_{21}. \qquad (7.1)$$

Konstanta n_{21} vadinama ***santykiniù lū̃žio rodikliù***, arba antrosios terpės lūžio rodikliu pirmosios terpės atžvilgiu.

Absoliutusis lūžio rodiklis

Absoliutusis lūžio rodiklis n nustatomas šviesai sklindant iš tuštumos (vakuumo) į skaidrią terpę. Tuštumoje šviesa sklinda $3 \cdot 10^8$ m/s greičiu, o perėjusi terpę – mažesniu greičiu. Šviesos greitį terpėje pažymėję v ($v < c$), galėsime teigti, kad ***absoliutùsis lū̃žio rodìklis lygus šviesos greičio tuštumoje ir terpėje santykiui:***

$$n = \frac{c}{v}. \qquad (7.2)$$

Vadinasi, jis yra terpės lūžio rodiklis tuštumos (vakuumo) atžvilgiu. Absoliutusis lūžio rodiklis rodo, kiek kartų sumažėja šviesos greitis terpėje, palyginti su jos greičiu tuštumoje.

Absoliutusis lūžio rodiklis yra vienos terpės savybė, nes šviesos greitis priklauso nuo terpės, kuria sklinda šviesa, fizinės būsenos: temperatūros, tankio, mechaninio įtempio. Antra vertus, jis pareina ir nuo pačios šviesos savybių: raudonos šviesos mažesnis negu žalios, o žalios – mažesnis nei violetinės. Įvairių terpių lūžio rodiklio verčių lentelėse nurodoma, kuriai šviesai taikoma n vertė, kokia yra terpės būsena. Oro absoliutusis lūžio rodiklis normaliosiomis sąlygomis artimas vienetui: $n = 1{,}000292$. Dėl to medžiagų lūžio rodiklis oro atžvilgiu mažai skiriasi nuo jų absoliu-

čiojo lūžio rodiklio. Kai kurių medžiagų lūžio rodiklio oro atžvilgiu (kai šviesa geltona) skaitinės vertės pateiktos vadovėlio prieduose (žr. p. 305). Medžiaga, kurios lūžio rodiklis didesnis, vadinama ***òptiškai tankesnė***. Pavyzdžiui, deimantas yra optiškai tankesnis už stiklą.

Santykinio ir absoliučiojo lūžio rodiklio ryšys

Santykinį lūžio rodiklį n_{21} su pirmosios ir antrosios terpės absoliučiaisiais lūžio rodikliais n_1 ir n_2 sieja lygybė

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \tag{7.3}$$

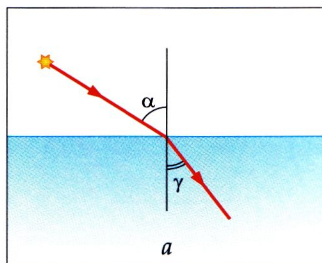
Atsižvelgę į absoliučiojo lūžio rodiklio fizikinę prasmę (7.2), santykinį lūžio rodiklį galime išreikšti šviesos greičių pirmojoje ir antrojoje terpėje santykiu:

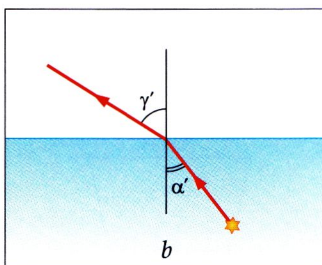
$$n_{21} = \frac{v_2}{v_1}. \tag{7.4}$$

Taigi santykinis lūžio rodiklis priklauso ne nuo vienos, bet nuo abiejų terpių savybių.

Spindulių eigos apgręžiamumas

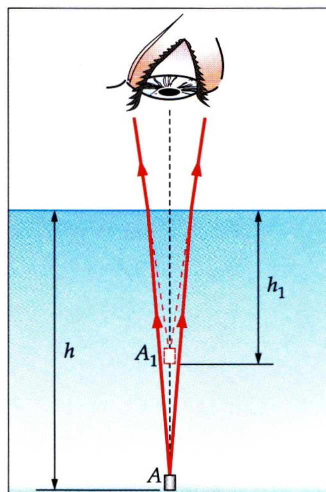
Šviesos lūžimui taip pat būdingas spindulių eigos apgręžiamumas. Krintantysis ir lūžęs spinduliai yra apgręžiami. Jeigu antrojoje terpėje spindulį nukreipsime į skiriamąjį paviršių lūžusio spindulio keliu, tai lūžęs jis sklis pirmąja terpe krintančiojo spindulio keliu (7.3.6 pav., *a*, *b*). Vadinasi, kai šviesos spindulys pereina iš optiškai tankesnės terpės į optiškai retesnę, lūžio kampas yra didesnis už kritimo kampą. Taip lūžta spinduliai, sklisdami, pavyzdžiui, iš vandens į orą. Dėl to vandens telkiniai atrodo seklesni (7.3.7 pav.).





7.3.6 pav.

7.3.7 pav.



Klausimai ir užduotys

1. Paaiškinkite, kodėl šviesa, pereidama į kitą terpę bet kokiu kampu, lūžta, o sklisdama statmenai – ne.

2. Ką vadiname absoliučiuoju lūžio rodikliu? Kokia yra fizikinė jo prasmė?



7.3.8 pav.

3. Ką vadiname santykiniu lūžio rodikliu? Kokia yra fizikinė jo prasmė?

4. Palyginkite spindulių sklidimą iš optiškai tankesnės terpės į optiškai retesnę ir atvirkščiai. Kuo jis skiriasi?

5. Vienas krokodilas kaitinosi ant upės kranto, kitas gulėjo paniręs po vandeniu (7.3.8 pav.). Kur krokodilai matė Saulę: tikrojoje jos padėtyje, aukščiau ar žemiau šios padėties? Atsakymą papildykite brėžiniu.

6. Apskaičiuokite vandens lūžio rodiklį deimanto atžvilgiu. (0,55)

7. Pirmosios „Optikos" kūrėjas Euklidas vieną savo tyrimo išvadą suformulavo taip: „Jei kokį nors daiktą padėsime ant indo dugno ir indą atitrauksime nuo akių tiek, kad to daikto nebematytume, tai, į indą pripylus vandens, daiktas vėl bus matomas iš to paties atstumo."

a) Nurodykite, kokį šviesos sklidimo reiškinį nagrinėjo Euklidas.

b) Brėždami patvirtinkite Euklido išvadą.

8. Spindulys pereina iš oro į stiklą, kurio lūžio rodiklis 1,47. Spindulio kritimo kampas 35°. Apskaičiuokite lūžio kampą. (23°)

9. Spindulys, sklindantis oru, krinta į deimanto paviršių 45° kampu. Kokiu kampu nuo pradinės krypties jis nukrypsta deimante? (28°)

10. Šviesos spindulys krinta į vandens paviršių 40° kampu. Kokiu kampu jis turi kristi į stiklo paviršių, kad lūžio kampas būtų toks pat? (51°)

11. Atlikite bandymą. Jam reikės skaidrios stiklinės plokštelės, popieriaus lapo ir šviesos šaltinio, skleidžiančio siaurą šviesos pluoštą. Ant popieriaus lapo padėkite plokš-

telę ir pieštuku nubrėžkite jos kontūrą. Į matinę plokštelės sienelę nukreipkite siaurą šviesos pluoštą (7.3.9 pav., *a*). Toliau bandymą atlikite pagal šias užduotis:

a) pažymėkite į plokštelę krintantį ir iš plokštelės išėjusį šviesos spindulį;

b) nuėmę plokštelę, pažymėkite šviesos spindulio kelią joje (7.3.9 pav., *b*);

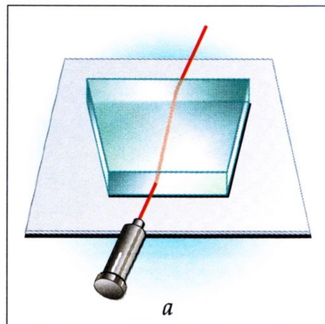
c) per spindulių kritimo taškus nubrėžkite statmenis plokštelės sienelėms;

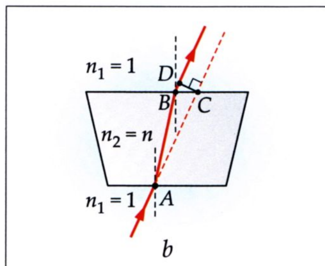
d) matlankiu išmatuokite šviesos spindulio kritimo ir lūžio kampą (taške *A* ir taške *B*), įvertinkite gautą rezultatą;

e) palyginkite spindulio kritimo kampą (taške *A*) ir lūžio kampą (taške *B*);

f) išmatuokite spindulio poslinkį *CD* ir parašykite, kaip jis kistų, jeigu didėtų plokštelės storis; mažėtų plokštelės optinis tankis.

12. Spindulys krinta 60° kampu į 2 cm storio gretasienę stiklinę plokštelę. Apskaičiuokite iš plokštelės išėjusio spindulio poslinkį. (1,2 cm)





7.3.9 pav.

7.4. Visiškasis šviesos atspindys

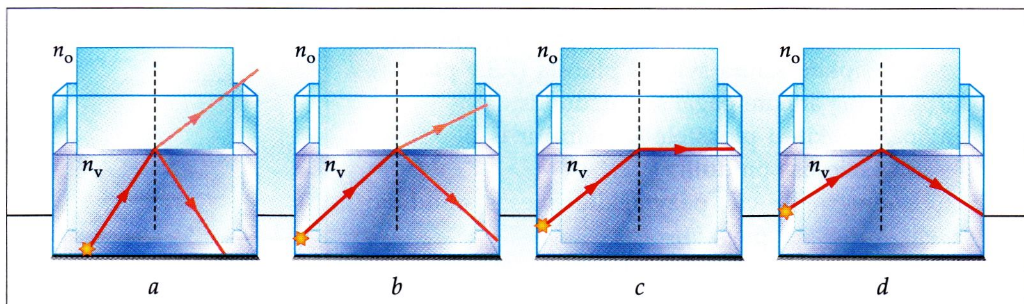
Visiškojo šviesos atspindžio reiškinys

Pagrindinės sąvokos

Vìsiškasis šviesõs atspindỹs,
ribìnis vìsiškojo ãtspindžio kam̃pas,
šviesólaidis.

Nagrinėdami lūžimą, rėmėmės šviesos, sklindančios iš optiškai retesnės terpės į optiškai tankesnę, pavyzdžiu. Tada lūžio kampas buvo mažesnis už kritimo kampą (7.3.4 pav.). Tačiau šviesa gali pereiti ir iš optiškai tankesnės terpės į optiškai retesnę. Šiuo atveju šviesos lūžio kampas bus didesnis už kritimo kampą.

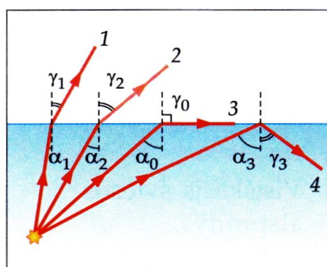
7.4.1 paveiksle, *a*, pavaizduotas indas, pripiltas dažyto vandens. Šviesos pluoštas nukreipiamas iš vandens į orą ($n_v > n_o$). Matome, kad, pasiekusi terpių ribą, šviesa iš dalies lūžta ir iš dalies atsispindi. Didinant kritimo kampą, lūžio kampas ir atsispindėjusio



7.4.1 pav.

spindulio ryškumas didėja (7.4.1 pav., *b*). Kai šviesa krinta tam tikru kampu, lūžio kampas įgyja didžiausią vertę (90°). Atsispindėjusio spindulio ryškumas padidėja dar labiau (7.4.1 pav., *c*), o lūžęs spindulys šliaužia terpes skiriančiu paviršiumi. Toliau didinant kritimo kampą, šviesa nebepereina į orą, bet visiškai atsispindi nuo jo ir vandens ribos (7.4.1 pav., *d*) kaip nuo veidrodžio – įvyksta visiškasis šviesos atspindys. Lūžęs spindulys išnyksta. ***Vìsiškuoju šviesõs ãtspindžiu vadinamas šviesos atspindys nuo optiškai retesnės terpės, kai šviesa nelūžta, o atsispindėjusios šviesos intensyvumas beveik lygus krintančios šviesos intensyvumui.***

Šviesos lūžimo dėsnio taikymas visiškajam atspindžiui



7.4.2 pav.

Visus nagrinėto bandymo etapus pavaizduokime brėžinyje (7.4.2 pav.). Sklisdama iš optiškai tankesnės terpės į optiškai retesnę, šviesa visiškai atsispindi, kai kritimo kampas yra didesnis už α_0 arba jam lygus (7.4.2 paveiksle visiškasis šviesos atspindys pažymėtas skaičiais *3* ir *4*). Kampas α_0, atitinkantis 90° lūžio kampą, vadinamas ***ribiniù vìsiškojo ãtspindžio kampù.***

Kai šviesa pereina iš vandens į orą, visiškojo atspindžio ribinio kampo skaitinę vertę nesunku apskaičiuoti taikant šviesos lūžimo dėsnį:

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90°} = \frac{n_o}{n_v},$$

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n_v}, \qquad (7.5)$$

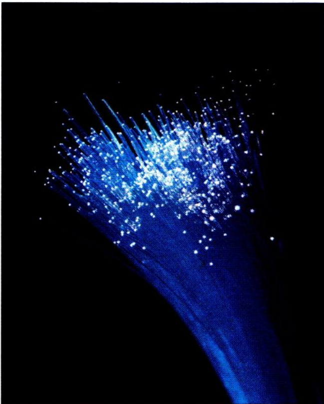
$$\alpha_0 = \arcsin \frac{1}{n_v},$$

$$\alpha_0 = 48°35'.$$

Remiantis 7.5 lygybe, galima rasti ir kitų medžiagų visiškojo atspindžio ribinio kampo skaitines vertes. Stiklo (n = 1,5) jis yra 41°50′, deimanto (n = 2,4) – 24°40′. Visais atvejais antroji terpė yra oras.

Visiškojo atspindžio taikymas praktikoje

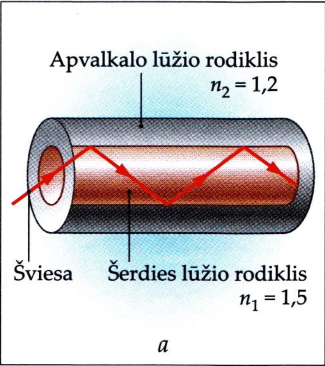
Visiškasis šviesos atspindys plačiai taikomas informacijai perduoti šviesolaidžiais. ***Šviesólaidžiu*** vadinamas labai plonų stiklo gijų kabelis (7.4.3 pav.). Jo šerdis yra siauras stiklinis cilindras, turintis didelį lūžio rodiklį. Šerdies skersmens ilgis gali siekti nuo kelių mikrometrų iki kelių milimetrų, nelygu, kokia yra šviesolaidžio paskirtis. Šerdis įvelkama į ploną stiklinį apvalkalą, kurio lūžio rodiklis mažesnis negu šerdies (7.4.4 pav., *a*). Šviesos pluoštas patenka į šviesolaidį dideliu kampu, didesniu už šerdies stiklo ribinį visiškojo atspindžio kampą. Nuo dviejų skirtingo optinio tankio (n_1 ir n_2) terpių ribos jis daug kartų visiškai atsispindi (7.4.4 pav., *a*) ir dėl to šviesolaidžiu sklinda tolyn. Šviesa sklinda ne tik tiesiu, bet ir susuktu šviesolaidžiu (7.4.4 pav., *b*).

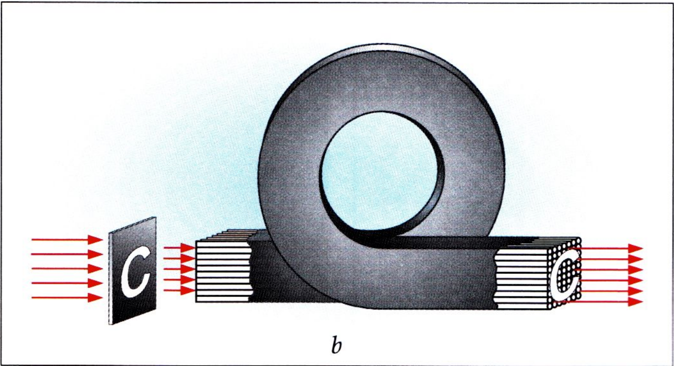


7.4.3 pav.

Šviesolaidžiais sklindančių signalų neveikia elektrinės jėgos, todėl jie mažiau iškraipomi. Dėl šios priežasties tarpžemyniniai telefoniniai pokalbiai vis dažniau perduodami ne ryšio palydovais, o vandenynų dugnu nutiestais šviesolaidžiais, kurie dar vadinami informacijos magistralėmis. Tokios ryšio sistemos yra labai brangios, todėl naudojamos ten, kur yra daug vartotojų. 1997 m. vasarą Báltijos jūros dugnu buvo nutiestas šviesolaidis, jungiantis Lietuvą su Švèdija ir kitomis Skandinãvijos šalimis. Jo ilgis 243 km.

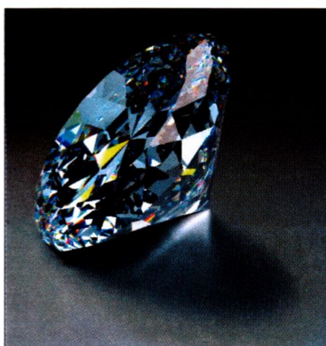
7.4.4 pav.







7.4.5 pav.



7.4.6 pav.

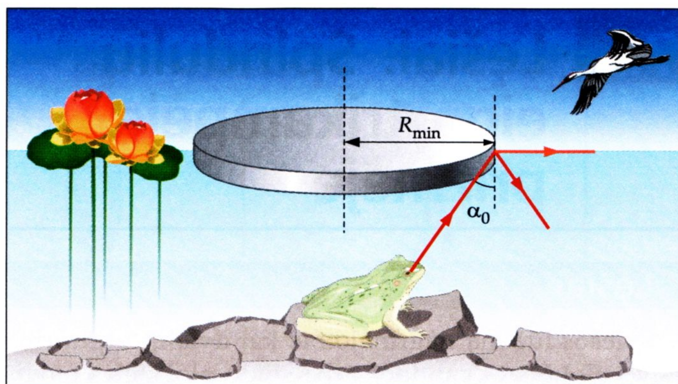
Šviesolaidiniai kabeliai naudojami interneto ryšiui palaikyti. Tokius kabelius sudaro keli šviesolaidžiai. Vienais iš jų informacija keliauja į vieną pusę, kitais – į priešingą. Kabelyje paprastai būna nuo šešių iki dvylikos šviesolaidžių. Kai reikia tuo pačiu metu perduoti daug signalų, telefono stotys sujungiamos šviesolaidžiais. Elektriniai impulsai paverčiami optiniais signalais. Pačiu naujausiu tarpžemyniniu optiniu kabeliu TAT 12/13 vienu metu galima perduoti 300 000 telefono pokalbių.

Šviesolaidžiai plačiai taikomi medicininiuose prietaisuose – endoskòpuose, t. y. zonduose, kurie naudojami vidaus organų (plaučių, skrandžio, kraujagyslių ir pan.) būklės diagnostikai. Endoskope yra dvi šviesolaidžio gijos. Viena iš jų šviesa sklinda tiriamojo organo link, kita – atsispindėjusi nuo vidaus organų sienelių.

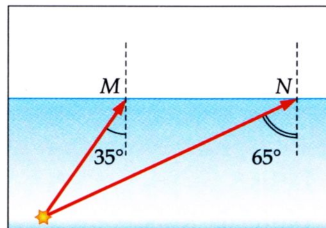
Visiškojo šviesos atspindžio reiškinių galima pamatyti mus supančioje aplinkoje. Tai rasos lašelių blizgėjimas (7.4.5 pav.), brangakmenių žėrėjimas (7.4.6 pav.), miražai (7.4.7 pav.) ir pan. Šlapio asfalto įspūdis karštą vasaros dieną taip pat yra miražas. Jis susidaro stipriai įkaitus kelio dangai. Nuo jos sušyla šalia esantis oras ir jo tankis pasidaro mažesnis negu aukščiau esančio šaltesnio oro. Dėl to dideliu kampu krintanti šviesa visiškai atsispindi nuo šalto ir šilto oro ribos, karštą vasaros dieną sudarydama šlapio kelio miražą.

7.4.7 pav.





7.4.8 pav.



7.4.9 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Koks fizikinis reiškinys vadinamas visiškuoju atspindžiu?

2. Ką vadiname ribiniu visiškojo atspindžio kampu?

3. Ribinis visiškojo atspindžio kampas rubine lygus 34°. Apskaičiuokite rubino lūžio rodiklį. (1,8)

4. Kokiu ribiniu kampu turi kristi šviesos spinduliai, kad pereitų iš deimanto į cukrų? (40,5°)

5. Negilaus tvenkinio dugne tupi varlė. Ji slepiasi po tvenkinio paviršiuje plūduriuojančiu dideliu apskritu dangčiu (7.4.8 pav.). Tvenkinio gylis 1 m. Koks turi būti mažiausias dangčio spindulys, kad gandras varlės nepastebėtų? (1,13 m)

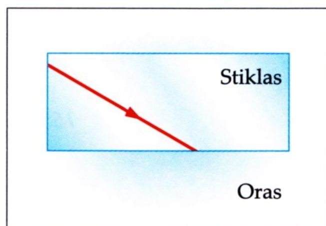
6. Iš indo dugne po vandeniu esančio šaltinio į taškus *M* ir *N* krinta šviesos spinduliai (7.4.9 pav.). Persibraižykite brėžinį savo sąsiuvinyje ir nubraižykite tolesnę spindulių eigą ore. Atsakymą pagrįskite.

7*. Į plokščią dviejų terpių (stiklo ir oro) paviršių iš stiklo pusės krinta šviesos spindulys (7.4.10 pav.). Spindulio kritimo kampas 60°, o stiklo lūžio rodiklis oro atžvilgiu 1,5.

a) Apskaičiuokite lūžio kampą.

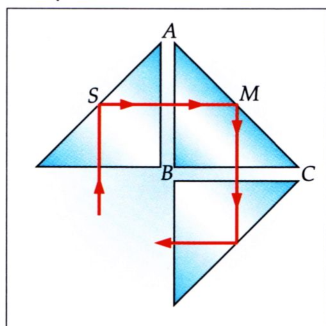
b) Nubraižykite tolesnę spindulio eigą.

8. Keletas prizmių gali pakeisti šviesos spindulio kryptį (7.4.11 pav.). Koks turi būti mažiausias stiklinės prizmės *ABC* kampas *A*, kad spindulys *SM* visiškai atsispindėtų? (39°)



7.4.10 pav.

7.4.11 pav.



7.5. Lęšiai. Spindulių eiga trikampėje prizmėje

Pagrindinės sąvokos

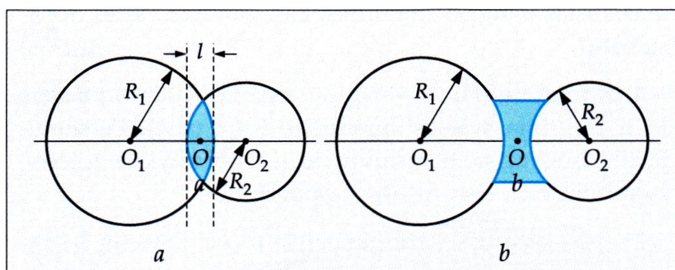
Lę̃šis,
plonàsis lę̃šis,
glaudžiamàsis lę̃šis,
sklaĩdomasis lę̃šis,
prìzmės laužiamàsis kam̃pas,
spiñdulio núokrypio kam̃pas.

Lęšiai

Šviesos lūžimą nagrinėjome, kai dviejų terpių riba buvo plokščia – vandens arba stiklo plokštelės paviršius. Tačiau mus supančioje aplinkoje šviesa dažnai lūžta išlenktuose paviršiuose. Jei, netyčia sudaužę stiklainį, pažiūrėjote pro jo šukes, galėjote matyti, kad daiktų padėtis ir matmenys atrodo pakitę. Primename, kad pro gretasienę stiklo plokštelę (kurios paviršius plokščias) matomas daiktas atrodo tokio pat dydžio, pasikeičia tik jo padėtis.

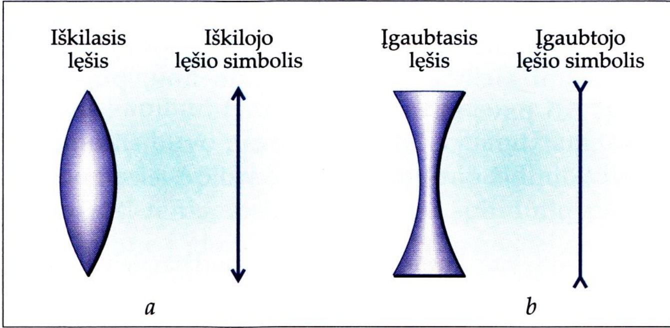
Norėdami paaiškinti daiktų formos ir matmenų pasikeitimą, turime prisiminti lęšį – daugelio optinių prietaisų (fotoaparatų, teleskopų, mikroskopų, akinių ir kt.) sudedamąją dalį. ***Lęšiù vadinamas skaidrus kūnas, apribotas dviejų rutuliškųjų paviršių.*** (Vienas tų paviršių gali būti ir plokščias.) Lęšiai gaminami iš specialių rūšių stiklo, plastiko ar kitų skaidrių medžiagų, o jų paviršiai dažniausiai daromi rutuliški (7.5.1 pav.).

7.5.1 pav.



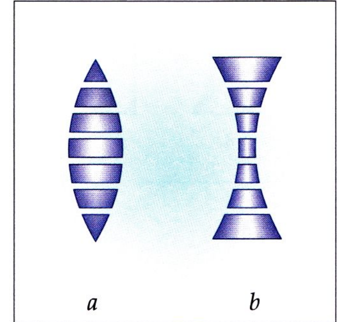
Mokykliniame fizikos kurse nagrinėjami ***plonie̍ji lę̃šiai***, t. y. tokie, kurių storis l, palyginti su jų paviršių kreivumo spinduliais R_1 ir R_2, yra labai mažas (7.5.1 pav.). Čia ir toliau plonąjį lęšį vadinsime tiesiog lęšiu.

Pagal formą lęšiai skirstomi į iškiluosius (7.5.2 pav., *a*) ir įgaubtuosius (7.5.2 pav., *b*). Braižant spindulių eigą, nepatogu kaskart piešti lęšį, todėl jį nutarta žymėti sutartiniu ženklu (7.5.2 pav., *a* ir *b*, dešinėje).



7.5.2 pav.

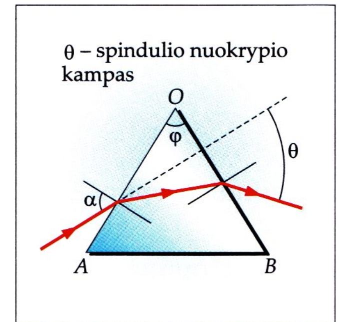
Lęšis, kuris centre yra storesnis negu kraštuose (iškilasis), vadinamas ***glaudžiamúoju lęšiù***, nes spindulius glaudžia. Lęšis, kuris centre yra plonesnis negu kraštuose (įgaubtasis), vadinamas ***sklaĩdomuoju lęšiù***, mat jis spindulius sklaido.



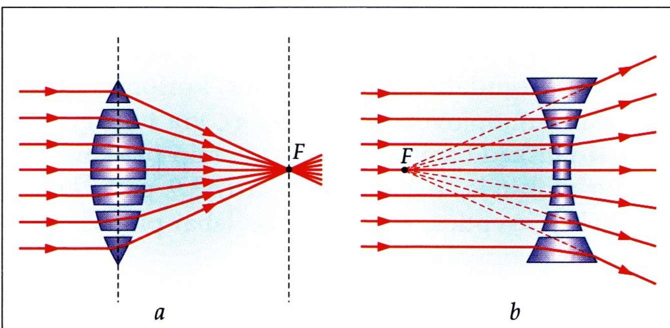
7.5.3 pav.

Spindulių eiga trikampėje prizmėje

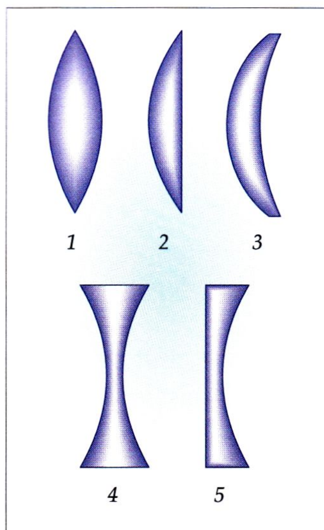
Spindulių eiga sklaidomajame ir glaudžiamajame lęšyje skiriasi. Norėdami išsiaiškinti, kodėl jie šviesos spindulius glaudžia arba sklaido, turime aptarti dar vieną svarbų optinį prietaisą – prìzmę. Ji naudojama žiūronuose, periskopuose ir kt. Į lęšį galima žiūrėti kaip į prizmių visumą (7.5.3 pav.). Šviesos spindulys kiekvienoje prizmėje lūžta du kartus (7.5.4 pav.): paviršiuje AO ir paviršiuje OB. Kampas φ tarp šių paviršių vadinamas ***laužiamúoju prìzmės kampù***. Šviesos spindulys, pereidamas prizmę, nukrypsta jos pagrindo link. Šį nuokrypį apibūdina ***spiñdulio núokrypio kam̃pas*** θ. Jis priklauso nuo laužiamojo prizmės kampo, medžiagos, iš kurios padaryta prizmė, lūžio rodiklio n ir spindulio kritimo kampo α. Glaudžiamąjį lęšį sudarančios prizmės išdėstytos taip, kad iš kurio nors taško sklindanti šviesa, lūžusi lęšyje, susirinktų



7.5.4 pav.



7.5.5 pav.



7.5.6 pav.

viename taške (7.5.5 pav., *a*). Sklaidomajame lęšyje prizmės yra tarsi apverstos. Dėl to šviesos spinduliai, užlinkdami kiekvienos jų pagrindo link, prasiskleidžia (7.5.5 pav., *b*).

Klausimai ir užduotys ??

1. Nurodykite, kurie šių lęšių yra glaudžiamieji, kurie – sklaidomieji (7.5.6 pav.).

2. Paaiškinkite, kodėl glaudžiamasis lęšis spindulius glaudžia, o sklaidomasis sklaido.

3. Nuo ko priklauso spindulių, perėjusių prizmę, nuokrypio kampas?

4. Pro stiklinę prizmę stebimo daikto atvaizdas atrodo pasislinkęs. Į kurią pusę? Atsakymą papildykite brėžiniu.

7.6. Lęšį apibūdinančios sąvokos. Lęšio laužiamoji geba

! Pagrindinės sąvokos

Pagrindìnė òptinė ašìs, šalutìnė òptinė ašìs, òptinis ceñtras, pagrindìnis židinỹs, žìdinio núotolis, žìdinio plokštumà, laužiamóji gebà.

Lęšį apibūdinančios sąvokos

Temos pradžioje perskaitę pagrindines sąvokas, tikriausiai nustebote – visos jos žinomos iš X klasės kurso. Jos yra svarbios nagrinėjant kitas geometrinės optikos temas, todėl prie jų grįžtame dar kartą.

• ***Pagrindìnė òptinė ašìs*** – tiesė O_1O_2, einanti per lęšio paviršių kreivumo centrus (7.6.1 pav.).

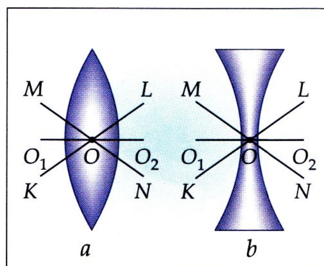
• ***Òptinis ceñtras*** – pagrindinės optinės ašies taškas *O*, per kurį eidama šviesa nelūžta. Kodėl taip yra, paaiškinti nesudėtinga. Plokštumos, kuriomis susiliečia rutulių nuopjovos (7.5.1 pav., *a*), yra lygiagrečios. Per lęšio tašką *O* spindulys pereina taip pat kaip gretasiene plokštele, t. y. pasislenka (7.3.9 pav., *b*), bet nepakeičia krypties. Kadangi lęšis labai plonas, spindulio poslinkio galima nepaisyti.

• ***Šalutìnė òptinė ašìs*** – kiekviena tiesė, einanti per lęšio optinį centrą *O* (išskyrus pagrindinę optinę ašį).

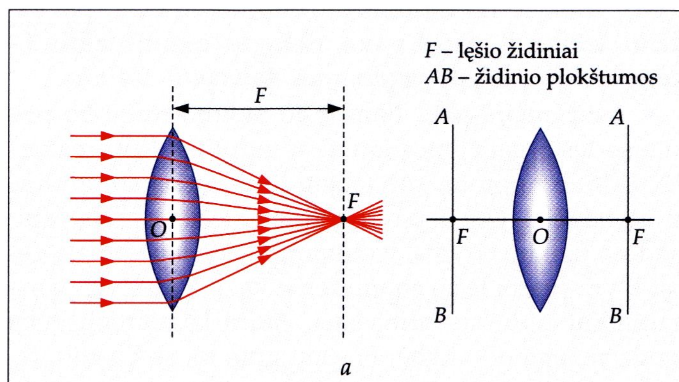
7.6.1 paveiksle O_1O_2 yra pagrindinė optinė ašis, o *MN* ir *KL* – šalutinės optinės ašys.

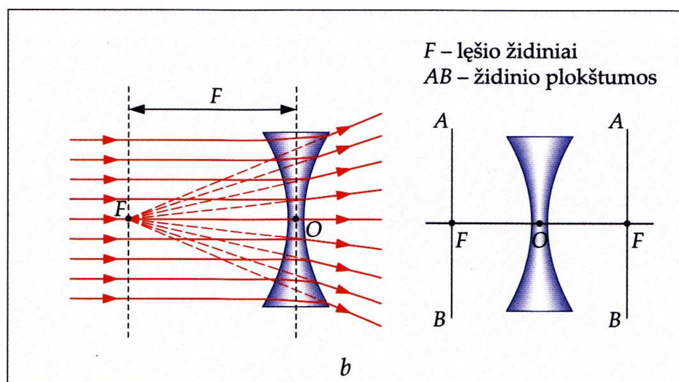
• ***Pagrindìnis židinỹs.*** Apibrėždami pirmąsias tris sąvokas, apibūdinančias lęšį, nepaisėme jo rūšies, t. y. mums buvo nesvarbu, ar lęšis glaudžiamasis, ar sklaidomasis. Apibrėžiant pagrindinio židinio sąvoką, į lęšio rūšį tenka atsižvelgti. Jeigu spindulių pluoštą nukreipsime į glaudžiamąjį lęšį lygiagrečiai su jo pagrindine optine ašimi, už lęšio jis susirinks viename taške (7.6.2 pav., *a*). ***Taškas, kuriame už glaudžiamojo lęšio susirenka lygiagrečiai su pagrindine optine ašimi sklidę spinduliai, vadinamas pagrindiniù žìdiniu.*** Jis žymimas raide *F*. Lygiagrečius su pagrindine optine ašimi spindulius galima nukreipti iš priešingos lęšio pusės. Tada, perėję lęšį, jie susirinks kitame židinyje. Vadinasi, lęšis turi du pagrindinius židinius, vienodai nutolusius nuo optinio centro.

Glaudžiamojo lęšio pagrindinis židinys vadinamas tikruoju, nes jame susirenka patys spinduliai. Šiame židinyje padėta fotojuostos atraiža, popieriaus skiautelė ar nedidelis vatos gumulėlis gali užsiliepsnoti



7.6.1 pav.



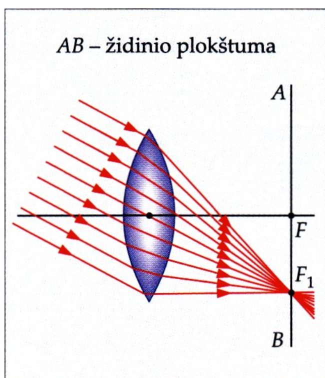


7.6.2 pav.


7.6.3 pav.

(7.6.3 pav.), mat Saulės energija, perėjusi lęšį, susikoncentruoja mažame paviršiaus plote. Jeigu lygiagrečiai su pagrindine optine ašimi sklindantį pluoštą nukreipsime į sklaidomąjį lęšį, spinduliai už jo sklis prasiskleidžiančiu pluoštu (7.6.2 pav., *b*) taip, kad viename taške (*F*) susikirs jų tęsiniai. Taškas, kuriame susikerta už lęšio sklindančių spindulių tęsiniai, vadinamas sklaidomojo lęšio pagrindiniu židiniu. Jis yra menamasis, nes šiame taške susikerta ne patys spinduliai, bet jų tęsiniai. Jeigu sklaidomojo lęšio židinyje pastatytume ekraną, šviesos šaltinio atvaizdas jame nesusidarytų. Sklaidomasis lęšis, kaip ir glaudžiamasis, turi du pagrindinius židinius.

- ***Žìdinio núotolis*** – atstumas *OF* nuo lęšio optinio centro iki pagrindinio židinio (7.6.2 pav., *a* ir *b*). Židinio nuotolis žymimas ta pačia raide *F* kaip ir pagrindinis židinys.

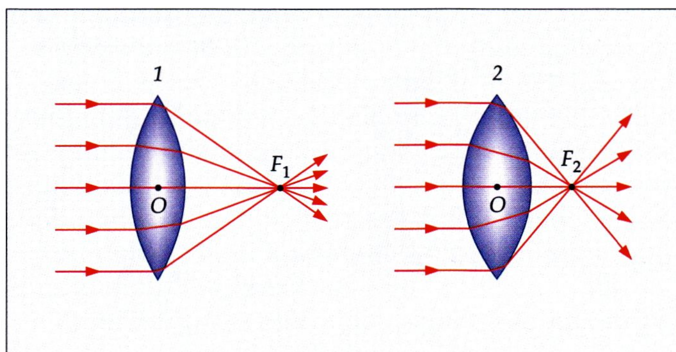


7.6.4 pav.

- ***Žìdinio plokštumà*** – plokštuma, einanti per lęšio pagrindinį židinį statmenai pagrindinei optinei ašiai (7.6.2 pav., *a* ir *b*). Lęšio židinio plokštumoje susirenka su kiekviena optine ašimi lygiagretūs spinduliai (7.6.4 pav.). Kiekvienas židinio plokštumos taškas, pavyzdžiui, taškas F_1 (7.6.4 pav.), išskyrus esantį pagrindinėje optinėje ašyje, vadinamas ***šalutiniù žìdiniu***.

- ***Laužiamóji gebà***. Nuo lęšio židinio nuotolio priklauso lęšio gebėjimas laužti spindulius. Kuo mažesnis židinio nuotolis, tuo labiau lęšis laužia spindulius ir atvirkščiai (7.6.5 pav.). Minėtą lęšio savybę apibūdina fizikinis dydis, vadinamas lęšio laužiamąja geba. Ji yra svarbi lęšio charakteristika. Į ją atsižvelgiama gaminant optinius prietaisus. Akies laužiamoji geba lemia regėjimo kokybę. Plačiau apie tai sužinosite temoje „Akis – optinė sistema".

7.6.5 pav.



Lęšio laužiamoji geba

Lęšio laužiamóji gebà yra fizikinis dydis, atvirkščias židinio nuotoliui. Ji žymima raide D. Taigi

$$D = \frac{1}{F}. \quad (7.6)$$

Laužiamosios gebos matavimo vienetas yra *diòptrija*, žymima ta pačia raide kaip ir pati laužiamoji geba[1]. Vienos dioptrijos laužiamąją gebą turi lęšis, kurio židinio nuotolis lygus vienam metrui:

$$[D] = 1\ \mathrm{m}^{-1} = 1\ \mathrm{D}.$$

Lęšio laužiamoji geba priklauso nuo jo formos. Iškilesnių (arba įgaubtesnių) lęšių ji yra didesnė (7.6.5 pav.). Laužiamoji geba taip pat priklauso nuo medžiagos, iš kurios pagamintas lęšis, santykinio lūžio rodiklio n. Tie lęšiai, kurių medžiagos lūžio rodiklis didesnis, spindulius laužia labiau. Glaudžiamųjų lęšių laužiamoji geba yra teigiama, sklaidomųjų – neigiama.

Lęšio laužiamąją gebą galima apskaičiuoti pagal formulę

$$D = \frac{1}{F} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right); \quad (7.7)$$

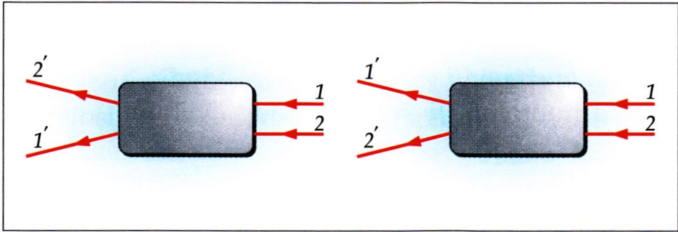
čia D – laužiamoji geba, F – židinio nuotolis, R_1 ir R_2 – lęšių rutuliškųjų paviršių spindulių ilgiai, n – medžiagos, iš kurios pagamintas lęšis, santykinis lūžio rodiklis. Jeigu lęšio paviršius iškilas, R yra teigiamas, jeigu įgaubtas – neigiamas. Jei vienas lęšio paviršius plokščias, tai jo $R \to \infty$. Tada, kai $n < 1$, t. y. kai lęšio medžiaga yra optiškai retesnė už aplinkos, iškilasis lęšis virsta sklaidomuoju, o įgaubtasis – glaudžiamuoju.

[1] Žinynuose ir enciklopedijose galite rasti ir tarptautinį dioptrijos žymenį dpt.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname lęšio pagrindiniu židiniu? Kodėl glaudžiamojo lęšio pagrindinis židinys yra tikrasis, o sklaidomojo – menamasis? Ar užsidegtų popieriaus juostelė, padėta sklaidomojo lęšio židinyje, jeigu į lęšį nukreiptume stiprų šviesos srautą?

2. Kaip bandymais galima nustatyti lęšio židinio nuotolį?



7.6.6 pav.

3. Nupieškite glaudžiamąjį ir sklaidomąjį lęšį. Pažymėkite jų optinį centrą, pagrindinę ir šalutinę optinę ašį, pagrindinius židinius, židinio nuotolį, židinio plokštumą.

4. Keturių lęšių laužiamoji geba yra tokio dydžio: $D_1 = -0{,}5$ D, $D_2 = 1{,}5$ D, $D_3 = 4{,}0$ D, $D_4 = -5$ D. Kurie šių lęšių yra glaudžiamieji, kurie – sklaidomieji? Atsakymą pagrįskite.

5. Vienoje dėžėje paslėptas glaudžiamasis lęšis, kitoje – sklaidomasis (7.6.6 pav.). Kuris lęšis yra kurioje dėžėje? Grafiškai nustatykite kiekvieno lęšio optinio centro ir židinio padėtį.

6. Vėlyvo rudens vakarą vaikai kieme paliko kai kuriuos savo žaislus, tarp jų ir nedidelį rutulio nuopjovos formos indelį, pripiltą vandens. Indelio spindulio ilgis 12 cm. Naktį pašalo ir vanduo indelyje virto ledu. Susidarė plokščiai iškilas ledinis lęšis (7.6.7 pav.). Apskaičiuokite jo laužiamąją gebą. (4,8 D)


7.6.7 pav.

7*. Stiklinio lęšio laužiamoji geba ore $D = 5$ D. Apskaičiuokite šio lęšio židinio nuotolį vandenyje. Stiklo lūžio rodiklis $n_s = 1{,}5$, vandens $n_v = 1{,}33$. (0,8 m)

7.7. Lęšiu gaunamo atvaizdo braižymas

! Pagrindinės sąvokos

Tikràsis ãtvaizdas, menamàsis ãtvaizdas.

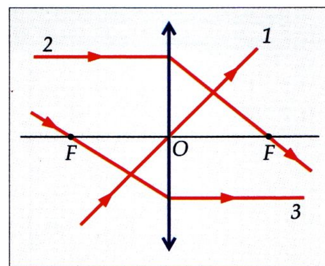
Pagrindinių spindulių sklidimas per glaudžiamąjį lęšį

Kiekvienas daiktas susideda ne iš vieno, o iš daugelio taškų. Todėl, norint nubraižyti daikto atvaizdą, sukuriamą glaudžiamojo lęšio, reikia mokėti braižyti taško atvaizdą. Prisiminkime svarbiausias spindulių

sklidimo per glaudžiamąjį lęšį taisykles (remkitės 7.7.1 paveikslu):

- spindulys *1*, einantis per lęšio optinį centrą, nelūžta;
- spindulys *2*, lygiagretus su pagrindine optine ašimi, lūžęs eina per lęšio židinį;
- spindulys *3*, einantis per lęšio židinį, lūžęs sklinda lygiagrečiai su pagrindine optine ašimi.

Žinant šias taisykles, glaudžiamojo lęšio židinio nuotolį ir židinio plokštumos apibrėžimą, galima nubraižyti bet kokiu kampu į glaudžiamąjį lęšį kritusio spindulio (7.7.2 pav., *a*, *1* spindulio) eigą už lęšio. Tereikia nubrėžti antrą spindulį (2), lygiagretų su pirmuoju ir einantį per optinį centrą (7.7.2 pav., *b*). Jis nelūžta ir, perėjęs lęšį, kerta židinio plokštumą taške *A*. Žinome, kad židinio plokštumoje susikerta visi lygiagretūs su šalutine optine ašimi spinduliai. Vadinasi, ir *1* spindulys lūžęs eis per tašką *A*.

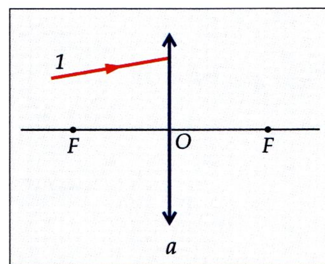


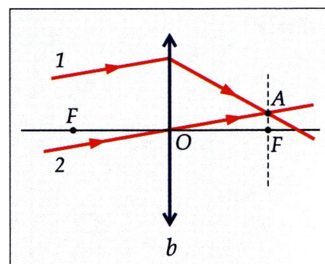
7.7.1 pav.

Glaudžiamuoju lęšiu gaunamo atvaizdo braižymas

Kai reikia nubraižyti daikto *AB* atvaizdą, gaunamą glaudžiamuoju lęšiu, pirmiausia randame kraštinių daikto taškų *A* ir *B* (7.7.3 pav.) atvaizdus. Taško *A* atvaizdo ieškome taip. Vieną spindulį iš taško *A* į lęšį nukreipiame lygiagrečiai su pagrindine optine ašimi. Lūžęs jis eina per židinį. Kitą spindulį brėžiame per optinį centrą. Ten, kur už lęšio susikerta abu šie spinduliai, ir susidaro taško *A* atvaizdas A_1. Jis yra tikrasis, nes čia susikerta patys spinduliai, o ne jų tęsiniai. Taigi taško atvaizdui nubraižyti pakanka dviejų spindulių. Iš taško A_1 nubrėžiame statmenį pagrindinei optinei ašiai ir randame tašką B_1, kuris yra taško *B* atvaizdas. A_1B_1 yra daikto *AB* ***tikràsis ãtvaizdas***. ***Menamàsis ãtvaizdas*** susidaro tada, kai už lęšio susikerta ne patys spinduliai, bet jų tęsiniai. Įsitikinome, kad, norint nubraižyti daikto atvaizdą, nebūtina ieškoti visų jo taškų atvaizdų. Pakanka rasti pradžios ir pabaigos taškų atvaizdus ir sujungti juos atkarpa.

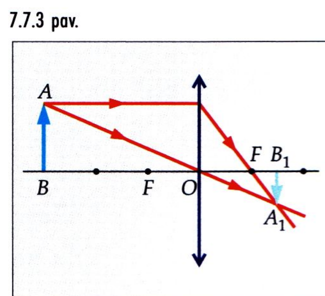
Iš 7.7.3 paveikslo matyti, kad daikto *AB* atvaizdas A_1B_1 yra sumažintas ir apverstas. Lentelėje apibūdinami daikto atvaizdai, kuriuos sukuria glaudžiamasis lęšis, kai daiktas nuo jo nutolęs įvairiu atstumu *d*.





7.7.2 pav.

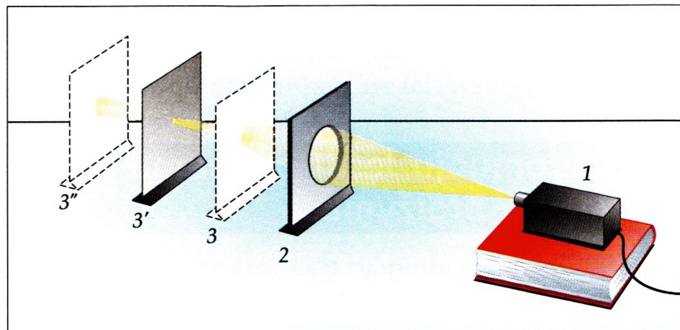
7.7.3 pav.



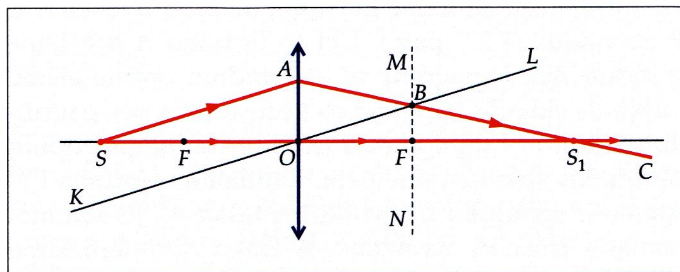
Daikto atstumas iki lęšio	Atvaizdo braižymas	Atvaizdo apibūdinimas
$d > 2F$		Tikrasis, apverstas, sumažintas
$d = 2F$		Tikrasis, apverstas, tokio pat dydžio kaip daiktas
$F < d < 2F$		Tikrasis, apverstas, padidintas
$d = F$		Atvaizdas nesusidaro
$d < F$		Menamasis, neapverstas, padidintas

Atvaizdo braižymas, kai šviečiantis taškas yra glaudžiamojo lęšio pagrindinėje optinėje ašyje

Į vieną tašką lęšis surenka ne tik lygiagrečius spindulius. Tuo nesunku įsitikinti atliekant bandymą. Jam reikia šviesos šaltinio *1*, glaudžiamojo lęšio *2* ir ekrano *3* (7.7.4 pav.). Keičiant ekrano padėtį (*3*, *3′* ir *3″* padėtis), jame galima gauti ryškų šviečiančio taško atvaizdą *3′*. Iš mažo šaltinio spinduliai sklinda prasiskleidžiančiu



7.7.4 pav.



7.7.5 pav.

pluoštu, o, perėję lęšį, susirenka viename taške. Kitaip tariant, lęšis sudaro tikrąjį šviečiančio taško atvaizdą. Tai įmanoma, kai šviečiantis taškas yra už lęšio pagrindinio židinio. Įrodykime tai braižydami.

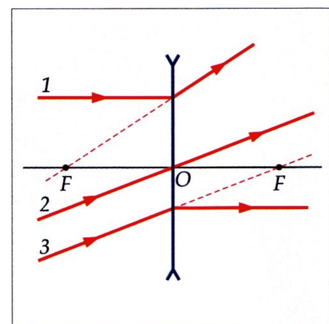
Pasirinkime spindulį *SO*, sklindantį pagrindine optine ašimi, ir spindulį *SA*, krintantį į lęšį kokiu nors kampu (7.7.5 pav.). Pirmasis ir už lęšio sklis pagrindine optine ašimi, o, norėdami rasti antrojo tolesnį sklidimo kelią, turėsime nubrėžti šalutinę optinę ašį *KL*, lygiagrečią su spinduliu *SA*. Pažymėkime židinio plokštumos padėtį *MN* ir raskime šios plokštumos bei šalutinės optinės ašies sankirtos tašką *B*. Per jį ir eis lūžęs spindulys. Pratęsę lūžusį spindulį, kol jis susikirs su pagrindine optine ašimi sklindančiu spinduliu, gausime šviečiančio taško *S* atvaizdą S_1. Šiuo atveju jis yra tikrasis.

Pagrindinių spindulių sklidimas per sklaidomąjį lęšį

Prisiminkime, kaip sklinda spinduliai, perėję sklaidomąjį lęšį (remkimės 7.7.6 paveikslu):

- spindulys *1*, lygiagretus su pagrindine optine ašimi, lūžęs sklinda už lęšio tokia kryptimi, kad jo tęsinys eina per pagrindinį židinį;

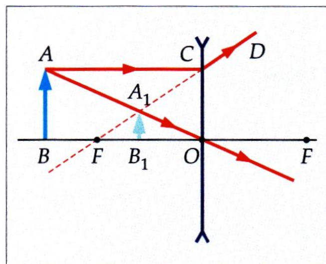
7.7.6 pav.



• spindulys 2, einantis per optinį centrą, nelūžta;

• spindulys 3, sklindantis pagrindinio židinio link, lūžęs eina lygiagrečiai su pagrindine optine ašimi.

Sklaidomuoju lęšiu gaunamo atvaizdo braižymas



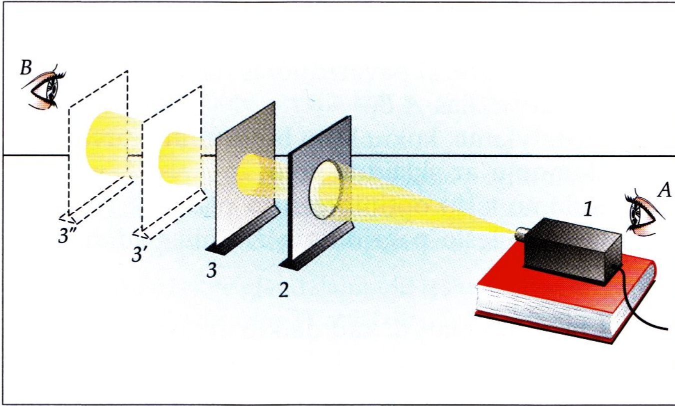
7.7.7 pav.

Braižydami sklaidomojo lęšio sukuriamą daikto atvaizdą, laikomės tų pačių reikalavimų, kaip ir braižydami glaudžiamuoju lęšiu gaunamą daikto atvaizdą. Pirmiausia randame kraštinių daikto *AB* taškų *A* ir *B* atvaizdus (7.7.7 pav.). Dėl to iš taško *A* brėžiame spindulį *AC*, lygiagretų su pagrindine optine ašimi. Lūžęs jis sklinda taip, kad jo tęsinys eina per pagrindinį židinį *F*. Kitą spindulį (*AO*) brėžiame per optinį centrą. Šis spindulys nelūžta. Randame spindulio *CD* tęsinio ir spindulio *AO* sankirtos tašką A_1. Jis yra menamasis taško *A* atvaizdas. Iš taško A_1 nuleidžiame statmenį į pagrindinę optinę ašį. Jo pagrindas (taškas B_1) – taško *B* atvaizdas. Daikto *AB* atvaizdas A_1B_1 yra menamasis, neapverstas ir sumažintas. Kad ir kokia būtų daikto padėtis sklaidomojo lęšio atžvilgiu, jo atvaizdas visada yra menamasis, neapverstas ir sumažintas. Be to, jis susidaro tarp židinio ir lęšio toje pačioje pusėje, kurioje yra daiktas.

Atvaizdo braižymas, kai šviečiantis taškas yra sklaidomojo lęšio pagrindinėje optinėje ašyje

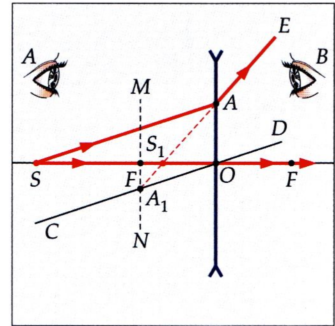
Šviesos šaltinio atvaizdą sklaidomuoju lęšiu galima gauti atliekant bandymą (7.7.8 pav.). Jam reikia šviesos šaltinio *1*, sklaidomojo lęšio 2 ir ekrano *3*. Keičiant ekrano padėtį, šviesos šaltinio atvaizdo aptikti nepavyks (jei akis bus padėtyje *A*). Ekranui tolstant, apšviestas plotas didės. Šviesos šaltinio atvaizdą galėtume matyti tik žiūrėdami į lęšį iš kairės (padėtis *B*), jeigu nebūtų ekrano. Gautą rezultatą paaiškinkime remdamiesi brėžiniu.

Ieškodami šviečiančio taško *S* atvaizdo, pasirenkame spindulį *SO*, sklindantį pagrindine optine ašimi (7.7.9 pav.). Imame dar vieną spindulį, pavyzdžiui, *SA*. Norėdami sužinoti jo eigą už lęšio, toje pačioje pusėje, kurioje yra šviečiantis taškas *S*, pažymime ži-



7.7.8 pav.

dinio plokštumą MN, be to, nubrėžiame šalutinę optinę ašį CD, lygiagrečią su spinduliu SA. Randame židinio plokštumos ir šalutinės optinės ašies sankirtos tašką A_1 (šalutinį židinį). Spindulys SA lūžęs sklinda už lęšio taip, kad jo tęsinys eina per tašką A_1. Spindulio AE tęsinio (brūkšninė linija) ir spindulio SO sankirtos taškas S_1 ir yra taško S atvaizdas. Taigi įsitikinome, kad, atliekant bandymą, šį atvaizdą buvo galima matyti žiūrint į lęšį iš padėties B. Atkreipiame dėmesį į tai, kad sklaidomasis lęšis visada sukuria menamąjį tikro šviesos šaltinio atvaizdą. Matomas šviečiantis taškas S_1 yra tik regėjimo iliuzija, nes jame susikerta patekusių į žmogaus akį spindulių tęsiniai. Ekraną pastatę taške S_1, šviečiančio taško nematysime.



7.7.9 pav.

Klausimai ir užduotys ??

1. Kokius spindulius patogu brėžti ieškant lęšiu gaunamo daikto atvaizdo?

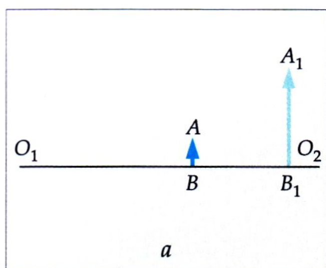
2. Kokius daiktų atvaizdus galima gauti glaudžiamaisiais lęšiais; sklaidomaisiais lęšiais?

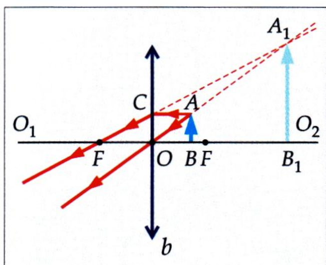
3. Kur gaunamas šviečiančio taško atvaizdas, kai daiktas yra glaudžiamojo lęšio pagrindinėje optinėje ašyje?

4. Glaudžiamuoju lęšiu ekrane buvo gautas degančios žvakės atvaizdas. Kaip jis pasikeistų, jeigu pusę lęšio uždengtume ranka?

5. Kodėl, nardydami be naro akinių, žmonės prastai mato vandens telkinyje esančius daiktus?

Mokomės spręsti uždavinius





7.7.10 pav.

7.7.10 paveiksle, *a*, pavaizduotas daiktas *AB* ir lęšiu gautas jo atvaizdas A_1B_1.

a) Nustatykime, kokiu lęšiu buvo gautas atvaizdas: glaudžiamuoju ar sklaidomuoju.

b) Raskime lęšio optinio centro padėtį.

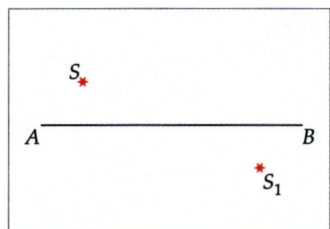
c) Raskime lęšio pagrindinių židinių padėtį.

Sprendimas

a) Iš brėžinio matyti, kad daikto atvaizdas A_1B_1 yra neapverstas ir padidintas. Tokį atvaizdą sukuria glaudžiamasis lęšis, kai daiktas yra tarp lęšio ir jo pagrindinio židinio (žr. paskutinę lentelės eilutę p. 34).

b) Palyginę nurodytos lentelės paskutinėje eilutėje pateiktą brėžinį su 7.7.10 paveikslu, *a*, matome, kad glaudžiamasis lęšis turi būti daikto *AB* kairėje. Žinodami, kad spindulys, einantis per lęšio optinį centrą, nelūžta, brėžiame spindulį A_1A. Jo ir pagrindinės optinės ašies sankirtos taškas *O* yra glaudžiamojo lęšio optinis centras. Dabar jau galime pavaizduoti ir patį glaudžiamąjį lęšį.

c) Ieškodami jo pagrindinio židinio padėties, remiamės antrąja spindulių eigos per glaudžiamąjį lęšį taisykle: lygiagrečiai su pagrindine optine ašimi sklindantis spindulys už lęšio eina per jo pagrindinį židinį. Iš taško *A* brėžiame spindulį *AC*, lygiagretų su ašimi O_1O_2 (7.7.10 pav., *b*). Randame spindulio A_1C ir ašies O_1O_2 sankirtos tašką *F*. Jis ir yra glaudžiamojo lęšio pagrindinis židinys. Tokiu pat atstumu nuo optinio centro kitoje lęšio pusėje pažymime antrąjį židinį.



7.7.11 pav.

Užduotys savarankiškam darbui

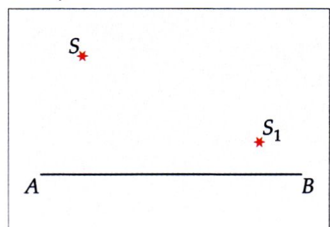
1. 7.7.11 paveiksle parodyta lęšio pagrindinės optinės ašies *AB*, šviečiančio taško *S* ir jo atvaizdo S_1 padėtis. Braižydami nustatykite lęšio optinio centro ir pagrindinių židinių padėtį.

2. 7.7.12 paveiksle nubraižyta lęšio pagrindinė optinė ašis *AB*, šviesos šaltinis *S* ir jo atvaizdas S_1.

a) Braižydami nustatykite lęšio optinio centro ir pagrindinių židinių padėtį.

b) Nustatykite lęšio rūšį: glaudžiamasis ar sklaidomasis.

7.7.12 pav.

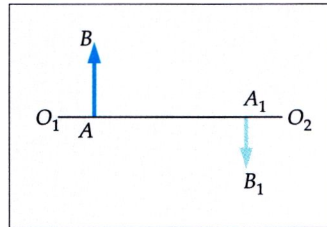


c) Nustatykite, koks yra atvaizdas: tikrasis ar menamasis.

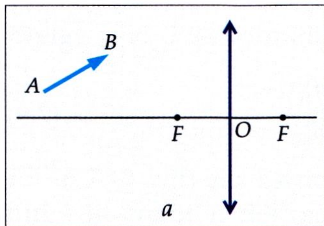
d) Išnagrinėkite atvejį, kai S_1 yra šviesos šaltinis, o S – jo atvaizdas.

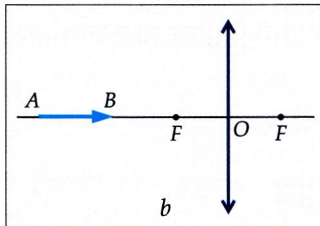
3. 7.7.13 paveiksle pavaizduota lęšio pagrindinė optinė ašis O_1O_2, daiktas AB ir jo atvaizdas A_1B_1. Braižydami raskite lęšio optinio centro ir pagrindinių židinių vietą.

4*. Nubraižykite glaudžiamuoju lęšiu gaunamą rodyklės AB (7.7.14 pav., *a* ir *b*) atvaizdą.



7.7.13 pav.





7.7.14 pav.

7.8. Lęšio didinimas. Plonojo lęšio formulė

Lęšio didinimas

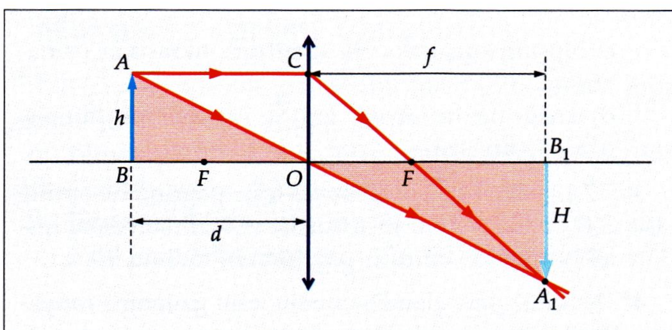
Braižydami lęšio kuriamus atvaizdus, įsitikinote, kad jie gali būti padidinti arba sumažinti. Atvaizdo ir daikto matmenų ryšį apibūdina fizikinis dydis, vadinamas lęšio tiesiniu didinimu. ***Lę̃šio tiesiniù dìdinimu vadinamas atvaizdo ir daikto tiesinių matmenų santykis.*** Jis yra žymimas graikų abėcėlės raide Γ (tariama gama). 7.8.1 paveiksle pavaizduotas daiktas, nutolęs nuo glaudžiamojo lęšio atstumu, didesniu už židinio nuotolį, bet mažesniu už dvigubą židinio nuotolį. Daikto atstumą iki lęšio įprasta žymėti raide *d*, atvaizdo – raide *f*, daikto aukštį – raide *h*, atvaizdo – raide *H*. Atsižvelgus į šiuos žymenis, lęšio tiesinį didinimą galima išreikšti taip:

$$\Gamma = \frac{H}{h}. \qquad (7.8)$$

Pagrindinės sąvokos

Lę̃šio tiesìnis dìdinimas,

lę̃šio fòrmulė.



7.8.1 pav.

Iš brėžinio (7.8.1 pav.) matyti, kad trikampiai ABO ir A_1B_1O yra panašūs, todėl

$$\frac{H}{h}=\frac{|f|}{|d|}, \tag{7.9}$$

arba

$$\Gamma=\frac{|f|}{|d|}. \tag{7.10}$$

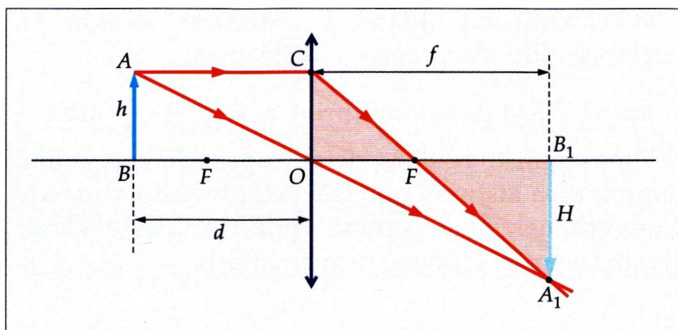
Taigi lęšio didinimą galima išreikšti daikto ir atvaizdo atstumų iki lęšio santykiu. Kai $\Gamma > 1$, daikto atvaizdas yra padidintas, kai $\Gamma < 1$ – sumažintas. Didinimo formulėje (7.10) modulio ženklas rašomas dėl to, kad didinimas nepriklauso nuo įeinančių į ją fizikinių dydžių ženklo.

Plonojo lęšio formulė

Abiem lęšio didinimo formulėmis remsimės išvesdami plonojo lęšio formulę, kurią trumpumo dėlei toliau vadinsime tiesiog ***lęšio fòrmule***. Ji taikoma daikto ir atvaizdo padėčiai nustatyti, lęšio židinio nuotoliui apskaičiuoti. Vadinasi, ieškant daikto atvaizdo, nebūtina kaskart braižyti brėžinį – optinę schemą. Tą patį galima padaryti ir matematiškai, tačiau reikia žinoti lęšio formulę. Ji sieja tris fizikinius dydžius: daikto atstumą d iki lęšio, atvaizdo atstumą f iki lęšio ir lęšio židinio nuotolį F. Išveskime šią formulę.

Trikampiai A_1B_1F ir COF (7.8.2 pav.) yra panašūs, todėl

$$\frac{H}{CO}=\frac{B_1F}{OF}. \tag{7.11}$$



7.8.2 pav.

Tačiau $CO = AB = h$, o $B_1F = OB_1 - OF = f - F$. Atsižvelgę į tai, 7.11 formulę galime užrašyti taip:

$$\frac{H}{h} = \frac{f - F}{F}. \tag{7.12}$$

7.9 ir 7.12 lygybių kairiosios pusės yra lygios, todėl turi būti lygios ir dešiniosios:

$$\frac{f}{d} = \frac{f - F}{F}.$$

Šią išraišką galime užrašyti kitaip:

$$fF = df - dF.$$

Visus gautos lygybės narius padaliję iš fdF ir pertvarkę reiškinį, gauname:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}. \tag{7.13}$$

Tai ir yra plonojo lęšio formulė. Prisiminę, kad židinio nuotoliui atvirkščias dydis yra lęšio laužiamoji geba, galime gauti kitą lęšio formulės išraišką:

$$D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}. \tag{7.14}$$

7.13 ir 7.14 formulę galima taikyti ir glaudžiamiesiems, ir sklaidomiesiems lęšiams, tačiau reikia paisyti šių taisyklių:

- kai daiktas tikrasis, jo atstumas d iki lęšio yra teigiamas;
- kai lęšio pagrindinis židinys tikrasis, vadinasi, lęšis glaudžiamasis, židinio nuotolis F yra teigiamas;
- kai lęšio židinys yra menamasis, taigi lęšis sklaidomasis, dydis F neigiamas;

- kai atvaizdas tikrasis, jo atstumas f iki lęšio yra teigiamas, kai menamasis – neigiamas.

Kai F, f ir d nežinomi, prieš narius $\frac{1}{F}$, $\frac{1}{f}$ arba $\frac{1}{d}$ rašomas pliuso ženklas. Jeigu, apskaičiavus židinio nuotolį arba atstumą nuo lęšio iki atvaizdo ar daikto, gaunama neigiama skaitinė vertė, vadinasi, židinys, atvaizdas arba daiktas yra menamasis.

Klausimai ir užduotys

1. Kokį lęšį vadiname plonuoju?

2. Ką vadiname plonojo lęšio formule?

3. Užrašykite plonojo lęšio formulę glaudžiamajam lęšiui; sklaidomajam lęšiui.

4. Glaudžiamasis lęšis pastatytas 1 m atstumu nuo šviečiančios elektros lemputės. Jos kaitinamojo siūlo atvaizdas susidaro už 25 cm nuo lęšio. Apskaičiuokite lęšio židinio nuotolį. (0,2 m)

5. Žvakė stovi 15 cm atstumu nuo glaudžiamojo lęšio, kurio laužiamoji geba 10 D. Kokiu atstumu nuo lęšio reikia pastatyti ekraną, kad jame susidarytų ryškus žvakės atvaizdas? (30 cm)

6. Lęšiu, kurio židinio nuotolis 20 cm, ekrane gautas ryškus daikto atvaizdas. Ekranas nutolęs nuo lęšio 1 m atstumu.

a) Apskaičiuokite daikto atstumą iki lęšio. (0,25 m)

b) Apibūdinkite daikto atvaizdą.

Mokomės spręsti uždavinius

1. Glaudžiamuoju lęšiu gautas tikrasis, du kartus padidintas daikto atvaizdas. Atstumas nuo lęšio iki atvaizdo lygus 30 cm.

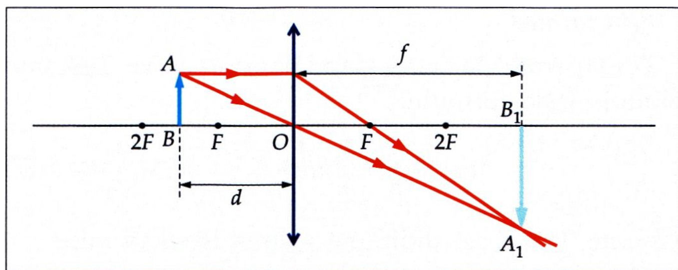
a) Nubraižykite atitinkamą brėžinį.

b) Apskaičiuokite lęšio židinio nuotolį.

F – ?	$\Gamma = 2$
	$f = 30$ cm $= 0{,}3$ m

Sprendimas

a) Uždavinio sąlygoje nurodyta, kad glaudžiamuoju lęšiu gautas tikrasis, padidintas atvaizdas. Vadina-



7.8.3 pav.

si, daiktas nutolęs nuo lęšio atstumu $F < d < 2F$. Atsižvelgdami į tai, nubraižome brėžinį (7.8.3 pav.).

b) Ieškodami lęšio židinio nuotolio, taikome plonojo lęšio formulę

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{d}+\frac{1}{f}.$$

Iš jos išreiškiame židinio nuotolį:

$$F=\frac{df}{f+d}. \quad (1)$$

Iš lęšio didinimo formulės išreiškiame daikto atstumą iki lęšio:

$$d=\frac{f}{\Gamma}. \quad (2)$$

2 formulę įrašę į 1 formulę, gauname tokią lęšio židinio nuotolio išraišką:

$$F=\frac{f}{1+\Gamma}.$$

Įrašome į ją dydžių vertes:

$$F=\frac{0{,}3\text{ m}}{1+2}=0{,}1\text{ m}.$$

Atsakymas: 0,1 m.

2. Fotoaparatai – optiniai prietaisai, naudojami daikto atvaizdui kurti ir fiksuoti šviesai jautrioje juostoje. 7.8.4 paveiksle pavaizduotas fotoaparatas, kuriame didžiausias atstumas nuo objektyvo (plonojo lęšio) iki fotojuostos yra 1,5 karto didesnis už objektyvo židinio nuotolį. Tarkime, kad šiuo fotoaparatu fotografuojamas mažas plokščias daiktas. Apskaičiuokime to daikto ir jo atvaizdo fotojuostoje matmenų santykį.


7.8.4 pav.

$\frac{h}{H}$ – ?	$f = 1{,}5F$

Sprendimas

Fotoaparate įtaisytas glaudžiamasis lęšis. Taikome plonojo lęšio formulę

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{d}+\frac{1}{f}. \quad (1)$$

Žinome, kad lęšio didinimą galima išreikšti taip:

$$\frac{H}{h}=\frac{|f|}{|d|}. \quad (2)$$

Atsižvelgę į uždavinio sąlygą, lęšio formulę užrašome taip:

$$\frac{1{,}5}{f}-\frac{1}{f}=\frac{1}{d}. \quad (3)$$

Iš 3 formulės išeina, kad

$$\frac{|d|}{|f|}=2.$$

Atsižvelgę į tai, pagal 2 formulę apskaičiuojame daikto ir jo atvaizdo fotojuostoje aukščių santykį:

$$\frac{h}{H}=2.$$

Atsakymas: 2.

3*. Kai fotografuojama 4,25 m atstumu, gaunamas 2,7 mm aukščio atvaizdas, o kai 1 m atstumu – 12 mm aukščio. Koks yra objektyvo židinio nuotolis?

F – ?	d_1 = 4,25 m d_2 = 1 m H_1 = 2,7 mm = 0,0027 m H_2 = 12 mm = 0,012 m

Sprendimas

Taikome plonojo lęšio formulę

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{d}+\frac{1}{f}. \quad (1)$$

Iš jos išreiškiame atvaizdo nuotolį iki lęšio:

$$f=\frac{dF}{d-F}. \quad (2)$$

Objektyvo lęšio didinimas

$$\Gamma = \frac{|f|}{|d|} = \frac{H}{h}. \quad (3)$$

3 formulę įrašę į 2 formulę, gauname:

$$\frac{H}{h} = \frac{F}{d-F}. \quad (4)$$

4 lygtį pritaikome abiem fotografavimo atvejams ir iš gautų lygčių išreiškiame lęšio židinio nuotolį:

$$F = \frac{H_2 d_2 - H_1 d_1}{H_2 - H_1}.$$

Įrašę dydžių vertes, gauname:

$$F = \frac{0{,}012\ \text{m} \cdot 1\ \text{m} - 0{,}0027\ \text{m} \cdot 4{,}25\ \text{m}}{0{,}012\ \text{m} - 0{,}0027\ \text{m}} = 5{,}6 \cdot 10^{-2}\ \text{m}.$$

Atsakymas: $5{,}6 \cdot 10^{-2}$ m.

Užduotys savarankiškam darbui

1. 1,8 m atstumu nuo glaudžiamojo lęšio stovi daiktas. Jo atvaizdas yra 5 kartus mažesnis už patį daiktą. Apskaičiuokite lęšio židinio nuotolį. (0,3 m)

2. Sklaidomuoju lęšiu, esančiu už 80 cm nuo daikto, gaunamas menamasis, 4 kartus sumažintas atvaizdas. Apskaičiuokite lęšio židinio nuotolį. (0,27 cm)

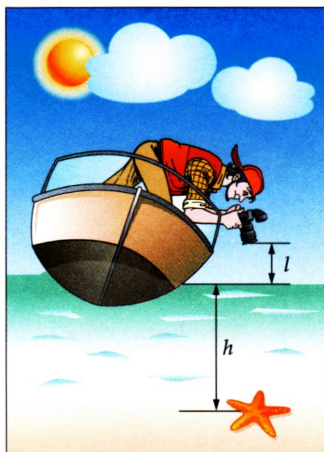
3. Fotoaparato objektyvo židinio nuotolis 4 cm. Kokiu atstumu nuo fotoaparato reikia padėti knygą, kad jos atvaizdas sudarytų $\frac{1}{24}$ natūralaus jos dydžio? (1 m)

4. 24 cm atstumu nuo abipus iškilo lęšio padėtas daiktas. Jo atvaizdas susidaro 0,4 m atstumu nuo lęšio.

a) Apskaičiuokite lęšio laužiamąją gebą. (≈ 6,7 D)
b) Apskaičiuokite lęšio židinio nuotolį. (0,15 m)
c) Apskaičiuokite lęšio didinimą. (≈ 1,7)
d) Pasirinktu masteliu nubraižykite atitinkamą brėžinį.

5. 3,8 cm atstumu nuo lęšio padėto daikto atvaizdas yra menamasis ir 4,5 karto padidintas.

a) Nurodykite, koks tai lęšis.
b) Apskaičiuokite jo laužiamąją gebą. (≈ 20 D)
c) Pasirinktu masteliu nubraižykite atitinkamą brėžinį.



7.8.5 pav.

6. Daiktas yra 12 cm atstumu nuo abipus įgaubto lęšio, kurio židinio nuotolis 10 cm.

a) Nurodykite, koks tai lęšis.

b) Apskaičiuokite atvaizdo atstumą iki lęšio. (5,5 cm)

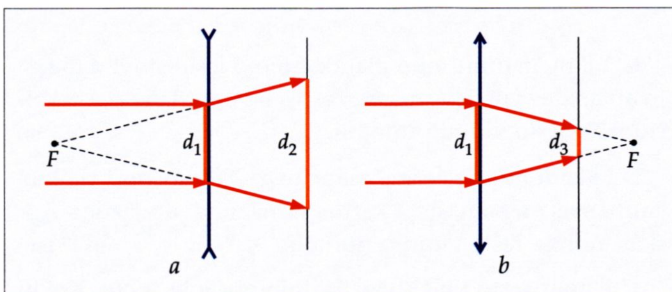
c) Apibūdinkite atvaizdą.

d) Nubraižykite atitinkamą brėžinį.

7. Okeanologas iš valties fotografuoja jūros žvaigždę (7.8.5 pav.), esančią vandenyje, h = 2 m gylyje. Fotoaparato židinio nuotolis 10 cm, atstumas nuo fotoaparato iki vandens paviršiaus l = 50 cm. Vandens lūžio rodiklis 1,33. Apskaičiuokite, kiek kartų atvaizdas fotojuostoje bus mažesnis už pačią jūros žvaigždę. (19 kartų)

8*. Ritinio formos spindulių pluoštas, kurio skersmens ilgis d_1 = 10 cm, krinta į sklaidomąjį lęšį (7.8.6 pav., *a*) lygiagrečiai su jo pagrindine optine ašimi. Už lęšio pastatytame ekrane susidaro šviesi dėmė. Jos skersmens ilgis d_2 = 14 cm. Koks būtų šviesios dėmės skersmens ilgis, jeigu sklaidomąjį lęšį pakeistume glaudžiamuoju, kurio židinio nuotolis toks pat (7.8.6 pav., *b*)? (6 cm)

7.8.6 pav.



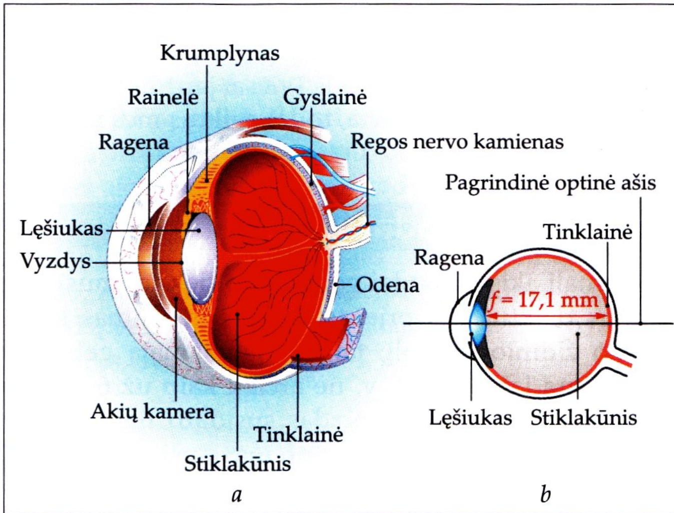
Pagrindinės sąvokos

Lęšiùkas, akomodãcija, adaptãcija, konvergeñcija, geriáusio mãtymo núotolis, trumparegỹstė, toliaregỹstė.

7.9. Akis – optinė sistema

Akies sandara

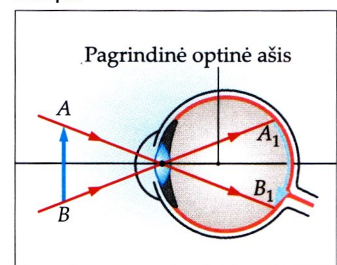
Žmogaus regėjimo organas – akis – yra nesudėtinga, tačiau labai tobula optinė sistema. Akies sandarą plačiai nagrinėjote per anatomijos pamokas, su akimi, kaip optine sistema, šiek tiek susipažinote X klasėje per fizikos pamokas. Dabar tereikia visas žinias apibendrinti ir praplėsti.



7.9.1 pav.

Žmogaus akis yra beveik rutulio formos (7.9.1 pav., *a*). Jos matmenys maždaug tokie: 24 mm išilgai pagrindinės optinės ašies (akies gylis) ir 22 mm statmenai šiai ašiai. Neskaidrus, balkšvas išorinis akies apvalkalas vadinamas ***odenà***. Priekinė, iškilesnė, jos dalis – skaidri ***ragenà***. Jos lūžio rodiklis $n_r \approx 1{,}376$. Vidinė odenos dalis padengta gyslaine, kuri prieš rageną pereina į ***rainẽlę***. Ši būna įvairių spalvų. Nuo ragenos rainelę skiria skaidraus akių skysčio pilna kamera. Rainelės centre yra apskrita anga, vadinama ***vyzdžiù***. Jo skersmenį keičia akies rainelė. Taigi ji atlieka diafragmos vaidmenį, reguliuoja į akį patenkančios šviesos kiekį. Kai šviesu, vyzdys susiaurėja ir į akį patenka mažiau šviesos. Tamsiu metu vyzdys išsiplečia įleisdamas daugiau šviesos. Akies obuolyje už vyzdžio yra ***lęšiùkas*** – abipus iškilas skaidrus lęšis. Jo lūžio rodiklis 1,4. Vidinė lęšiuko sandara gana sudėtinga – jį sudaro apie 22 000 plonų sluoksnių. Lęšiuką juosia žiedinis raumuo, susietas su krumplynu. Susitraukdamas arba atsipalaiduodamas jis keičia lęšiuko paviršiaus kreivumą, o kartu ir laužiamąją gebą. Visa vidinė akies obuolio dalis sudaryta iš skaidrios (n_s = 1,3) drebučių pavidalo medžiagos, vadinamos ***stiklãkūniu***. Ragena, akių kameros skystis, lęšiukas ir stiklakūnis sudaro optinę akies sistemą, analogišką glaudžiamajam lęšiui (7.9.1 pav., *b*). Jos optinis centras yra maždaug už 17,1 mm nuo ***tinklaĩnės*** – gyslainės dalies, iš vidaus padengtos šviesai jautraus nervo atšakomis, kurios ypač tankiai išsidėsčiusios prieš vyzdį.

7.9.2 pav.



Normalios akies visa optinė sistema tinklainėje sukuria apverstą daikto atvaizdą (7.9.2 pav.). Žmogaus smegenys, gavusios signalą iš šviesai jautrių tinklainės nervų, tą atvaizdą apverčia, todėl daiktus mes matome neapverstus.

Akies akomodacija

Normali akis vienodai gerai mato tiek tolimus, tiek artimus daiktus. To priežastis – jos gebėjimas keisti lęšiuko židinio nuotolį, taigi ir laužiamąją gebą. Jei daiktas yra labai toli, t. y. ne arčiau kaip už 6 m nuo akies, jos tinklainėje atvaizdas susidaro neįtempiant akies raumens. Tada šis raumuo mažiausiai pavargsta, o akis pailsi. Ne veltui, įtemptai padirbėjus prie kompiuterio ar ilgiau paskaičius knygą, rekomenduojama pažvelgti į tolį. Kai akies raumuo atsipalaidavęs, jos laužiamoji geba lygi 58 D. Artimų daiktų atvaizdai tuo metu susidaro už tinklainės, todėl yra neryškūs. Kad jie būtų ryškūs, reikia įtempti akies raumenį.

Daiktui artėjant, akies raumuo refleksiškai susitraukia, kartu suspausdamas ir lęšiuką. Šis dėl to labiau išsigaubia. Jo židinio nuotolis sumažėja (o laužiamoji geba padidėja) tiek, kad daikto atvaizdas projektuojamas į tinklainę. ***Akies lęšiuko gebėjimas keisti židinio nuotolį vadinamas akomodăcija*** (lot. *accomodatio* – pritaikymas, prisitaikymas). Dėl šios savybės įvairiai nutolusių daiktų atvaizdai visada susidaro akies tinklainėje ir būna ryškūs.

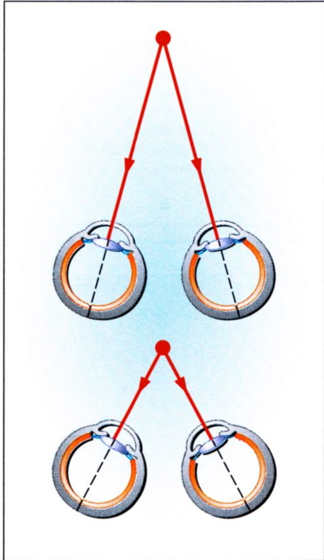
Vis dėlto akomodacija turi ribą – lęšiuko laužiamoji geba gali padidėti ne daugiau kaip 12 D. Ilgai žiūrint į artimus daiktus, akies raumuo pavargsta ir atsipalaiduoja. Tada arti esančių daiktų atvaizdai pasidaro neryškūs.

Akies adaptacija

Daiktus žmogus geriausiai mato dieną, kai šviesu. Tačiau jis regi juos ir prieblandoje, esant prastesniam apšvietimui. Akies gebėjimas prisitaikyti prie skirtingos matomų objektų apšvietos vadinamas ***adaptăcija*** (lot. *adaptatio* – pritaikymas, priderinimas). Jau minėjome, kad akies rainelė reguliuoja į akį patenkančios šviesos kiekį. Vadinasi, būtent ji padeda akiai prisitaikyti prie įvairios apšvietos.

Akių konvergencija

Žmogus puikiai mato daiktus viena akimi, tačiau atstumą iki jų gali įvertinti tik žiūrėdamas abiem akimis. Pasirinkus daiktą, akių obuoliai pasisuka ir jų optinės ašys pakrypsta taip, kad susikirstų tame daikte (7.9.3 pav.). Pagal akies obuolį valdančių raumenų įsitempimą smegenys nustato atstumą iki apžiūrimo daikto. Akių gebėjimas pakreipti jų optines ašis į vieną tašką vadinamas ***konvergeñcija*** (lot. *convergens* – susieinantis, suartėjantis).

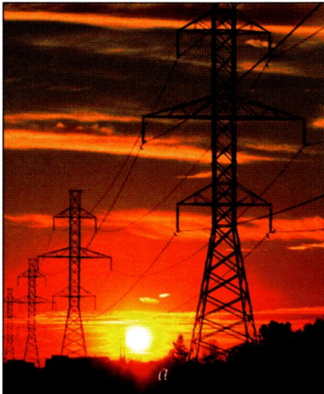


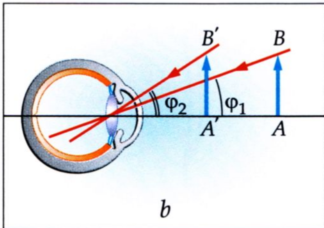
7.9.3 pav.

Regėjimo kampas

Tikriausiai pastebėjote, kad elektros stulpų linijos artimesni stulpai atrodo didesni negu esantys toliau (7.9.4 pav., *a*). Taip yra dėl to, kad artimesnių daiktų atvaizdai akies tinklainėje yra didesni. Atvaizdo dydis priklauso nuo regėjimo kampo φ, t. y. kampo, kurį sudaro spinduliai, einantys nuo kraštinių daikto taškų per akies optinį centrą (7.9.4 pav., *b*). Kuo labiau nuo akies nutolęs daiktas, tuo mažesnis regėjimo kampas. Kai regėjimo kampas pasidaro mažesnis už 1′, akis nebeišskiria daikto detalių ir mato jį kaip vieną tašką. Tada daikto atvaizdas uždengia tik vieną akies nervo galūnę. Žmogaus akis pradeda skirti daikto detales, kai jo atvaizdas akies tinklainėje apima ne mažiau kaip dvi nervo galūnes.

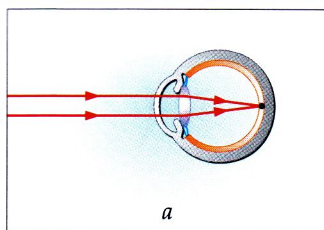
7.9.4 pav.

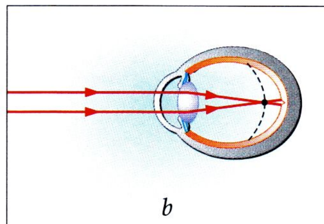


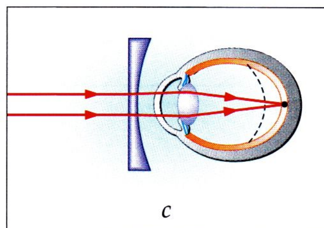


Geriausio matymo nuotolis

Daiktui artėjant, regėjimo kampas φ didėja, vadinasi, vis daugiau šviesai jautraus nervo galūnių tinklainėje apima to daikto atvaizdas ir galima geriau įžiūrėti daikto detales. Vis dėlto, norint įžiūrėti smulkias detales, negalima daikto per daug priartinti prie akies. Mažiausias atstumas, kuriuo akis be ypatingo raumenų įtempimo įžvelgia daikto detales, vadinamas ***geriáusio mãtymo núotoliu***. Normalios akies jis yra 25 cm. Tokiu atstumu nuo akių reikia laikyti skaitomą knygą ar rankdarbį. Jeigu geriausio matymo nuotoliu laikomos knygos raidės ar rankdarbio detalės yra blogai matomos, galima įtarti regėjimo sutrikimą.

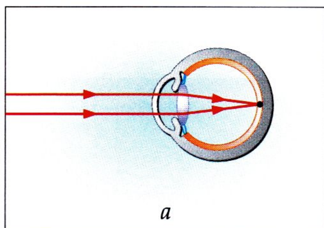

a

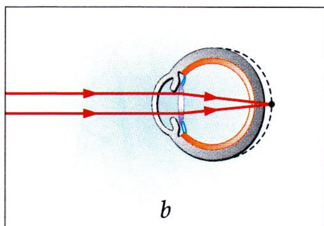

b

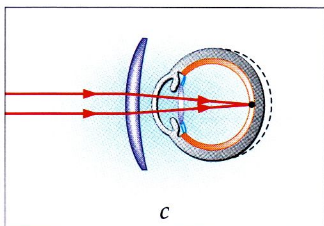

c

7.9.5 pav.

7.9.6 pav.


a


b


c

Akies optinės ydos ir jų koregavimas

Kai akis normali, tolimų daiktų atvaizdai susidaro jos tinklainėje (7.9.5 pav., *a*). Tačiau kai kurių žmonių akyse jie susidaro prieš tinklainę (7.9.5 pav., *b*). Ši regėjimo yda vadinama ***trumparegystė***. Trumparegės akies lęšiukas skiriasi nuo normalios akies lęšiuko savo forma – jis yra labiau išgaubtas. Trumparegiai žmonės prastai mato tolimus daiktus. Apžiūrimą daiktą arba skaitomą knygą jie priartina prie akių arčiau negu 25 cm.

Trumparegystės priežastis gali būti gilesnė akis (7.9.5 paveiksle, *b*, brūkšnine linija pažymėta normalaus gylio akies dešinioji riba). Dažnai ilgai skaitant arba rašant, akis nuolat verčiama įtempti lęšiuką. Siekdama to išvengti, ji ilgėja, t. y. didėja jos gylis.

Trumparegystę gali sukelti ir per stiprūs akies raumenys. Net ir atsipalaidavę, jie per daug suspaudžia lęšiuką. Dėl to jo laužiamoji geba padidėja ir daiktų atvaizdai susidaro prieš tinklainę.

Trumparegiams padeda akiniai su sklaidomaisiais lęšiais. Jų laužiamoji geba parenkama tokia, kad daikto atvaizdas susidarytų akies tinklainėje (7.9.5 pav., *c*). Trumparegių akinių laužiamoji geba yra neigiama (–0,5 D, –1 D ir pan.).

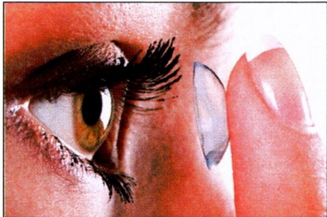
Kai tolimo daikto atvaizdas susidaro už akies tinklainės (7.9.6 pav., *b*), regėjimo yda vadinama ***toliaregystė***. Toliaregės akies lęšiukas yra plokštesnis, o gylis – mažesnis (žr. 7.9.6 paveikslą, *b*; brūkšninė linija) negu normalios akies. Toliaregiai prastai mato artimus daiktus. Jų geriausio matymo nuotolis yra didesnis kaip 25 cm. Norėdami kruopščiai apžiūrėti daiktą, toliaregiai stengiasi jį nutolinti nuo akių. Toliaregiams padeda akiniai su glaudžiamaisiais lęšiais (7.9.6 pav., *c*). Jų laužiamoji geba parenkama tokia, kad lygiagretūs spinduliai susirinktų akies tinklainėje. Toliaregių naudojamų akinių laužiamoji geba yra teigiama (+0,5 D, +1 D ir pan.). Norint išvengti regėjimo ydų, reikia tausoti akis. Negalima skaityti esant silpnam ar pernelyg stipriam apšvietimui, gulint, važiuojant autobusu.

Toliaregystė vystosi žmogui senstant. Lentelėje pateikti duomenys rodo, kaip kinta normalios akies laužiamoji geba skirtingais amžiaus tarpsniais.

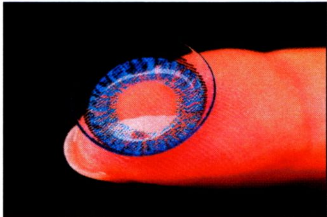
Žmogaus amžius metais	10	20	30	40	50	60	70
D_{max}, D	72,8	68,5	65,6	63	61	59	58,8
Atstumas, kuriuo daiktas matomas gerai, cm	7	10	14	22	40	200	400

Sąlytiniai lęšiai

Akiniai yra įrėminti lęšiai. Pastaruoju metu vis populiaresni neįrėminti lęšiai, vadinami sąlytìniais (7.9.7 pav.). Jie dedami po voku ant akies obuolio. Sąlytiniai lęšiai yra beveik nematomi. Jų naudojimo trukmė priklauso nuo priežiūros ir akių ypatybių (ligų, ašarų kiekio ir kokybės, polinkio į alergiją ir pan.). Sąlytiniai lęšiai gali būti vienadieniai, savaitiniai. Naujos kartos sąlytiniùs lęšiùs galima nešioti nenuimtus nuo akies 30 parų. Jie gaminami iš labai laidžios deguoniui medžiagos. Dėl to po sąlytiniu lęšiu geriau patenka ašaros ir pasišalina nuosėdos. Vis dėlto akių gydytojai pataria visų rūšių lęšius kas vakarą išimti – leisti akims pailsėti nuo dirginimo ir laisvai pakvėpuoti. Sąlytinių lęšių nepatariama nešioti peršalus, sloguojant, atsiradus vokų ar paakių uždegimui.


7.9.7 pav.

Gaminami ir spalvoti sąlytiniai lęšiai (7.9.8 pav.). Jie naudojami ne vien regėjimui koreguoti, bet ir norint paryškinti, pakeisti akių spalvą. Kartais jie gali būti išmarginti įvairiomis figūromis.

7.9.8 pav.


Klausimai ir užduotys

1. Apibūdinkite akies sandarą.

2. Kas lemia akomodaciją?

3. Paskaitęs knygą, Domantas pažvelgė pro langą į tolumoje mėlynuojantį mišką. Kaip pakito berniuko akies lęšiuko forma, kai jis nukreipė žvilgsnį nuo artimo daikto prie tolimo? Atsakymą pagrįskite.

4. Kada akies laužiamoji geba yra didesnė: kai žiūrime į artimus daiktus ar kai į tolimus? Atsakymą pagrįskite.

5. Vieno akinių lęšio laužiamoji geba 2,0 D, kito – 1,5 D. Koks kiekvieno lęšio židinio nuotolis? (0,5 m; 0,67 m)

6. Pagyvenęs žmogus geriausiai mato atstumu $d_1 =$ $= 60$ cm. Kokios laužiamosios gebos akinius jis turėtų įsigyti, kad gerai matytų atstumu $d_2 = 20$ cm? (3,33 D)

7. Laimos senelė gyvena 5 m aukščio name. Mergaitė stovėjo 50 m atstumu nuo šio namo ir žiūrėjo į jį. Kokio dydžio namo atvaizdas susidarė mergaitės akies tinklainėje? Jos akies židinio nuotolis lygus 1,5 cm. (1,5 mm)

8*. Laimos brolis skaito knygą, laikydamas ją 16 cm atstumu nuo akių. Kokios laužiamosios gebos akinius jis turėtų nešioti? (–2,25 D)

9. 15 cm aukščio daiktas padėtas 0,5 m atstumu nuo akinių, kurių laužiamoji geba –5 D.

a) Išspręskite šį uždavinį, pasirinktu masteliu nubraižydami atitinkamą brėžinį.

b) Nurodykite, kam skiriami šie akiniai: toliaregiams ar trumparegiams.

c) Apskaičiuokite, kurioje vietoje pro tokius akinius bus matomas daiktas. (0,1 m atstumu nuo akinių)

d) Apskaičiuokite daikto atvaizdo aukštį. (3 cm)

7.10. Optiniai prietaisai, didinantys regėjimo kampą

Pagrindinės sąvokos

Lupà, mikroskòpas.

Lupa

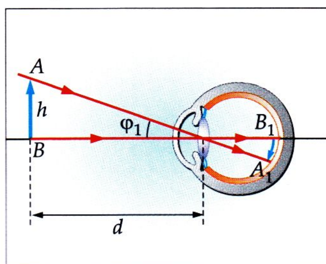
Daugeliui teko naudotis dìdinamuoju stiklù, kuris dažnai vadinamas ***lupà*** arba paprastúoju mikroskopù. Lupą sudaro glaudžiamasis lęšis, įdėtas į aptaisus. Nuo ko priklauso jos didinimas? Žinome, kad daikto atvaizdas būna tuo didesnis, kuo daugiau tinklainės nervo galūnių jis apima. Tada akis geriau įžiūri daikto detales, t. y. gauna daugiau informacijos apie daiktą. Galima susieti daikto dydį h, geriausio matymo nuotolį d ir regėjimo kampą φ. Iš 7.10.1 paveikslo matyti, kad

$$\mathrm{tg}\ \varphi_1 = \frac{h}{d}.$$

Matematikos kurse įrodoma, kad mažų kampų tangentai lygūs patiems kampams ($\mathrm{tg}\ \varphi \approx \varphi$), todėl

$$\varphi_1 \approx \frac{h}{d}. \qquad (7.15)$$

7.10.1 pav.



Pro lupą apžiūrimas daiktas dedamas tarp lupos ir jos židinio. Tada lupa sukuria menamąjį, neapverstą ir padidintą daikto atvaizdą, kuris yra geriausiu matymo nuotoliu nuo akies. Taip laikomą daiktą apžiūrėti patogiau, nes akies įtempimas yra mažiausias. Dabar daiktas matomas kampu φ_2, didesniu už regėjimo kampą φ_1, todėl galima įžvelgti ir plika akimi nematomas jo detales. Regėjimo kampą, kai naudojama lupa, galima išreikšti taip:

$$\varphi_2 \approx \frac{h}{d} = \frac{h}{F}. \qquad (7.16)$$

Tada lupos kampinis didinimas bus lygus

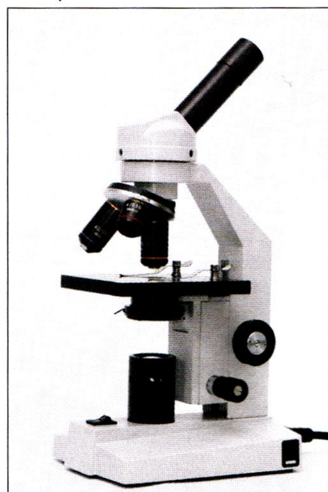
$$\Gamma = \frac{\mathrm{tg}\,\varphi_2}{\mathrm{tg}\,\varphi_1} = \frac{h}{F} : \frac{h}{d} = \frac{d}{F}. \qquad (7.17)$$

Iš 7.17 formulės matyti, kad lupos kampinis didinimas priklauso nuo jos židinio nuotolio. Vadinasi, ***lupa yra trumpo židinio nuotolio glaudžiamasis lęšis.*** Kuo mažesnis jos židinio nuotolis, tuo geriau ji didina. Tačiau, kai lupos židinio nuotolis labai mažas, daikto atvaizdas iškraipomas. Mažiausias galimas lupos židinio nuotolis yra 2 cm. Iš 7.17 formulės nesunku suprasti, kad lupa gali didinti ne daugiau kaip 10 kartų.

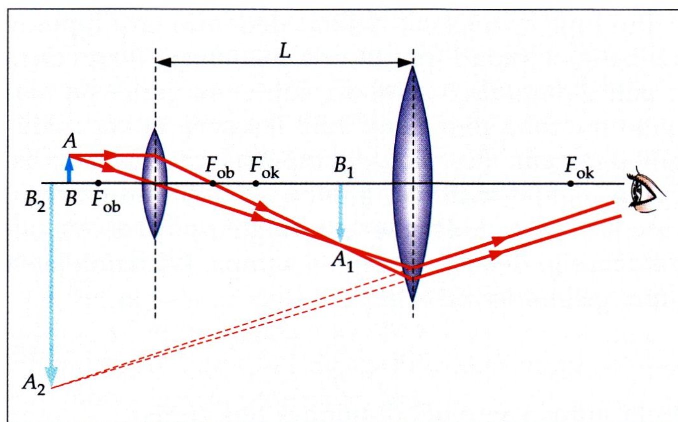
Mikroskopas

Prietaisas, daug kartų padidinantis daiktų atvaizdus, vadinamas ***mikroskopù*** (gr. *mikros* – mažas, *skopeō* – žiūriu, stebiu). Jį (7.10.2 pav.) sudaro du glaudžiamieji lęšiai: objektyvas ir okuliaras. Objektyvu vadinamas lęšis, prieš kurį dedamas daiktas, okuliaru – lęšis, pro kurį žiūrima. Mikroskopo objektyvas ir okuliaras įstatomi į metalinį vamzdį. Stebimas daiktas dedamas ant mikroskopo stalelio ir iš apačios apšviečiamas.

7.10.2 pav.



Regėjimo kampas, taigi ir daikto atvaizdas, mikroskope didinamas du kartus. Daiktas AB dedamas tuoj už objektyvo židinio (7.10.3 pav.). Objektyvas sukuria prieš okuliarą padidintą daikto AB atvaizdą A_1B_1. Okuliaras sureguliuojamas taip, kad atvaizdas A_1B_1 būtų okuliaro židinyje. Okuliaras veikia kaip lupa ir sukuria menamąjį, neapverstą ir padidintą atvaizdo A_1B_1 atvaizdą A_2B_2. Mikroskopo optiniai elementai suderinami taip, kad atvaizdas būtų matomas 25 cm atstumu nuo akies.



7.10.3 pav.

Mikroskopo kampinis didinimas priklauso nuo abiejų lęšių didinimo:

$$\Gamma = \Gamma_{ob} \cdot \Gamma_{ok}, \tag{7.18}$$

arba

$$\Gamma = \frac{25L}{F_{ob} \cdot F_{ok}}; \tag{7.19}$$

čia L – atstumas nuo objektyvo iki okuliaro. Iš 7.19 formulės matyti, kad mikroskopo kampinis didinimas yra atvirkščiai proporcingas objektyvo ir okuliaro židinio nuotoliui. Vadinasi, norint mikroskopu kuo daugiau padidinti atvaizdą, reikia naudoti mažo židinio nuotolio lęšius. Optiniai mikroskopai gali didinti iki 1200 kartų.

Klausimai ir užduotys

1. Kokį lęšį vadiname didinamuoju stiklu, arba lupa?

2. Lupos židinio nuotolis lygus 10 cm. Kiek kartų didina ši lupa? (2,5 karto)

3. Lupa didina 10 kartų. Apskaičiuokite jos laužiamąją gebą. (40 D)

4. Kas sudaro mikroskopo optinę sistemą? Paaiškinkite spindulių eigą joje.

5. Mikroskopo objektyvas buvo pakeistas kitu, kurio židinio nuotolis perpus mažesnis. Kaip ir kiek kartų pakito mikroskopo kampinis didinimas?

6. Mikroskopo objektyvo židinio nuotolis 1 cm, okuliaro – 2 cm. Atstumas nuo objektyvo iki okuliaro 19 cm. Apskaičiuokite mikroskopo kampinį didinimą. (200)

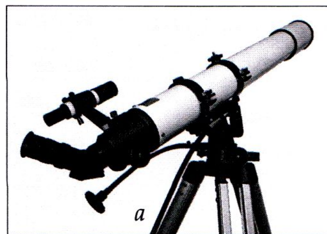
7.11. Optiniai prietaisai astronomijoje

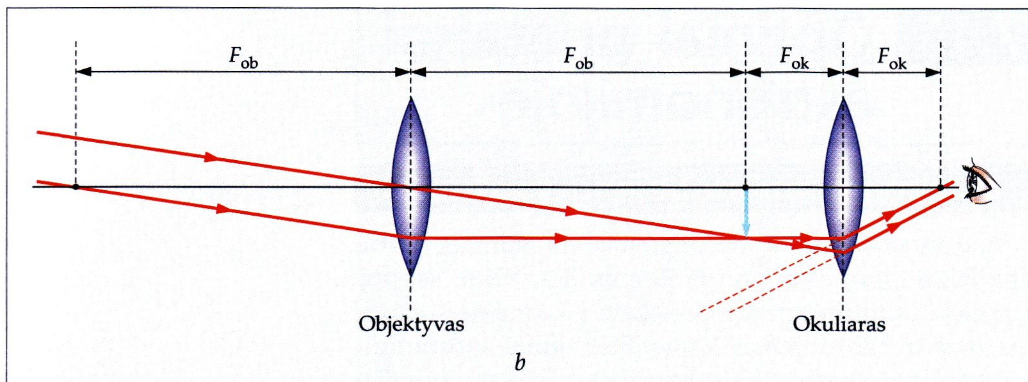
Astronominių stebėjimų ypatumai

Astronomijos mokslas pagrįstas stebėjimais, kurie ilgą laiką buvo vykdomi iš Žemės. Tik XX a. septintajame dešimtmetyje jie persikėlė į kosmosą – automatines ir pilotuojamas stotis. Stebėjimai astronomijai tokie pat svarbūs kaip bandymai fizikai, chemijai ir biologijai. Jie, palyginti su kitų gamtos mokslų tyrimais, turi išskirtinių bruožų. Vienas iš jų – stebint negalima tiesiogiai veikti dangaus kūnų. Be to, daugelis astronominių reiškinių vyksta labai lėtai. Stebėjimams įtaką daro Žemės sukimasis, nors dažnai Žemėje esantis stebėtojas laikomas nejudančia atskaitos sistema. Dar vienas astronominių stebėjimų ypatumas tas, kad dangaus kūnai yra labai toli nuo mūsų. Todėl tikrą jų išsidėstymą sunku įvertinti tiek plika akimi, tiek naudojant prietaisus. Vienas svarbiausių astronomijoje naudojamų prietaisų yra teleskòpas (gr. *tele* – toli, *skopeō* – žiūriu, stebiu). Jis skiriamas labai tolimų objektų padidintiems atvaizdams gauti. Teleskopas, kurio objektyvą sudaro įgaubtasis veidrodis, vadinamas reflèktoriumi, o kurio objektyvą sudaro lęšiai – refrãktoriumi. Teleskopo paskirtis – surinkti kuo daugiau šviesos iš dangaus šaltinių ir kuo labiau padidinti objekto regėjimo kampą. Pirmąjį teleskopą 1609 m. pagamino italų fizikas Galileo Galilėjus (*Galileo Galilei*) ir vokiečių astronomas Johanas Kepleris (*Johannes Kepler*).

Kaip veikia teleskopas refraktorius (7.11.1 pav., *a*)? Jo optinę sistemą sudaro du glaudžiamieji lęšiai: objektyvas ir okuliaras. Drauge jie sukuria menamąjį, apverstą ir padidintą daikto atvaizdą. Spindulių eiga teleskope pavaizduota 7.11.1 paveiksle, *b*. Objektyvas paprastai parenkamas didelių matmenų ir mažos laužiamosios gebos, okuliaras veikia kaip lupa, pro kurią matomas objektyvo sukurtas daikto atvaizdas. Iš tolimo objekto sklindantys spinduliai yra lygiagretūs. Objektyvo židinio plokštumoje susidaro tikrasis daikto atvaizdas. Okuliaras sureguliuojamas taip, kad tas atvaizdas būtų jo židinyje. Nesunku numanyti, kad

7.11.1 pav.





7.11.1 pav.

atstumas nuo objektyvo iki okuliaro lygus objektyvo ir okuliaro židinių nuotolių sumai. Vadinasi, teleskopo vamzdžio ilgis lygus

$$L = F_{ob} + F_{ok}. \tag{7.20}$$

Teleskopo kampinis didinimas išreiškiamas objektyvo ir okuliaro židinių nuotolių santykiu:

$$\Gamma = \frac{F_{ob}}{F_{ok}}. \tag{7.21}$$

Kad teleskopas didintų kuo daugiau, reikia imti didelio židinio nuotolio objektyvą ir mažo židinio nuotolio okuliarą. Teleskopo kampinis didinimas turi prasmę tik stebint tuos dangaus kūnus, kurių aiškūs matmenys (Mėnulio, planetų, galaktikų, Saulės ir pan.). Žvaigždės pro teleskopą atrodo kaip šviečiantys taškeliai, tačiau gerokai ryškesni. Jų ryškumas priklauso nuo teleskopo objektyvo ir akies vyzdžio plotų santykio. Kadangi į akį susirenka spinduliai, krintantys į visą teleskopo paviršių, tai iš visos objektyvo surinktos šviesos sudaromas spindulių pluoštas, kurio skersmuo atitinka akies vyzdį (≈ 5 mm). Teleskopas padeda įžvelgti silpnas žvaigždes. Pavyzdžiui, plika akimi galima matyti iki 6000 žvaigždžių, o pro teleskopą – iki 2 milijardų. Pro šiuolaikinius teleskopus plika akimi nežiūrima. Jie dažniausiai veikia kartu su kompiuterių technika.

Teleskopų refraktorių trūkumai

Į teleskopą patenkančios šviesos kiekis proporcingas objektyvo plotui. Kuo didesnis objektyvas, tuo silpniau šviečiančius objektus galima įžiūrėti. Dide-

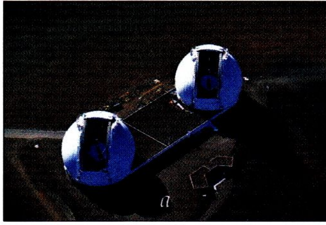
lius astronominius teleskopus pagaminti sudėtinga, nes jų objektyvai sukelia stiprią chromãtinę aberãciją (gr. *chrōma* – spalva, dažai, lot. *aberratio* – nukrypimas). Dėl jos apie šviesos dėmeles atsiranda vaivorykštės spalvos. Chromatinė aberacija kyla dėl to, kad įvairių spalvų spinduliai, sudarantys baltą šviesą, lęšyje lūžta skirtingai. Norint išvengti šio reiškinio, lęšių sistema gaminama iš skirtingų rūšių stiklo.

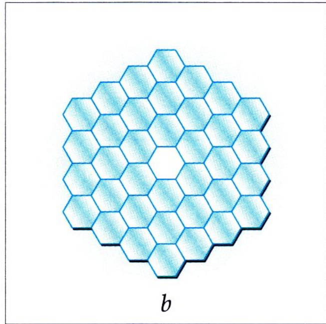
Didžiausi pasaulio teleskopai

Visame pasaulyje, tiek Šiaurės, tiek Pietų pusrutulyje, veikia daug stambių observatorijų, kuriose pastatyta įvairaus skersmens teleskopų. Paminėtini dideli Pietų pusrutulio astronomijos centrai Austrãlijoje, Pietų̃ Amèrikoje ir Pietų̃ Ãfrikoje, kur itin geros stebėjimo sąlygos. Nemažai didelių observatorijų su veikiančiais teleskopais yra Šiaurės pusrutulyje: JAV, Ispãnijoje, Rùsijoje ir kt. Lentelėje paminėti didžiausio skersmens teleskopai, pagaminti iki 1993 m.

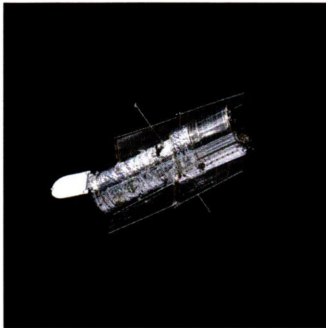
Apie teleskopus

Observatorijos ir teleskopo pavadinimas	Teleskopo skersmens ilgis, m	Aukštis virš jūros lygio, m	Pastatymo metai
Keko (*Keck*) teleskopas Mauna Kėjos (*Mauna Kea*) observatorijoje (JAV, Havajų salos)	10	4200	1992
Rusijos specialiosios astrofizikos observatorijos teleskopas Šiaurės Kaukaze	6	2070	1975
Heilo (*Hale*) teleskopas Maunt Palomaro (*Mount Palomar*) observatorijoje (JAV, Kalifornija)	5	1700	1949
Daugiaveidrodinis teleskopas Maunt Hopkinso (*Mount Hopkins*) observatorijoje (JAV, Arizona)	4,5	2600	1979
Didžiõsios Britãnijos teleskopas La Palma saloje (Kanarų salos)	4,2	2370	1987
Mejalio (*Mayall*) teleskopas Kit Piko (*Kitt Peak*) observatorijoje (JAV, Arizona)	4,0	2090	1973
1 m reflektorius Sero Tololo (*Cerro Tololo*) observatorijoje (Čìlė)	4,0	2500	1976
Ánglijos ir Austrãlijos teleskopas Saiding Springso (*Siding Springs*) observatorijoje (Austrãlija)	3,9	1200	1974
Didžiõsios Britãnijos teleskopas Mauna Kėjos observatorijoje (JAV, Havajų salos)	3,8	4200	1978
3,7 m reflektorius Euròpos pietinėje La Silos (*La Silla*) observatorijoje (Čìlė)	3,7	2450	1976
3,6 m naujosios technologijos teleskopas Euròpos pietinėje La Silos observatorijoje (Čìlė)	3,6	2450	1989
Kanãdos ir Prancūzìjos teleskopas Mauna Kėjos observatorijoje (JAV, Havajų salos)	3,6	4200	1979
Vokietìjos teleskopas Kalar Alto observatorijoje (Ispãnija)	3,6	2200	1984



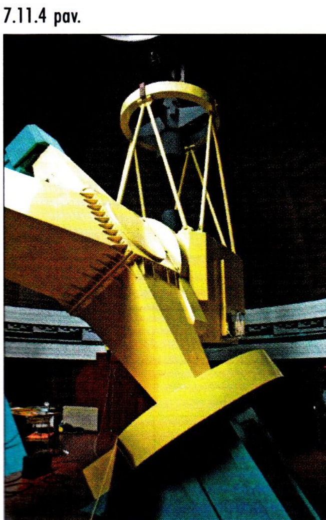


7.11.2 pav.



7.11.3 pav.

7.11.4 pav.



Iš lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad didžiausias pasaulyje veikiantis 10 m skersmens teleskopas (reflektorius) yra Mauna Kėjos observatorijoje (Havajų salose; 7.11.2 pav., *a*). Jo veidrodis sudarytas iš 36 šešiakampių veidrodžių, sudėtų kaip bičių korys (7.11.2 pav., *b*).

1990 m. balandžio 24 d. į orbitą 600 km aukštyje buvo paleista orbitinė observatorija su Hablio (*Hubble*) kosminiu teleskopu (7.11.3 pav.). Jo skersmens ilgis 2,4 m. Šiuo teleskopu gaunamos kokybiškesnės nuotraukos negu Žemės paviršiuje pastatytais teleskopais, nes jo neveikia atmosferos trikdžiai. Kas keleri metai pilotuojami erdvėlaiviai remontuoja šį teleskopą, keičia jo šviesos imtuvus.

Didžiausias Šiáurės Euròpos teleskopas yra Lietuvojè. Molétų astronomijos observatorijoje veikia 165 cm skersmens teleskopas reflektorius (7.11.4 pav.). Jo veidrodis pagamintas 1976 m. Lýtkarino optikos gamykloje. Stebėjimai pro šį teleskopą pradėti 1991 m. Deja, juo gaunamos informacijos Lietuvõs astronomams jau nebepakanka, todėl jie bendradarbiauja su kitų užsienio šalių astronomais. Šiuo metu Lietuvõs astronomai rengia kosminės observatorijos „Gala" projektą, naudojasi Čìlėje, Kanarų salose ir JAV esančiais teleskopais, apdoroja kosminių observatorijų duomenis.

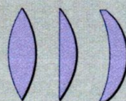
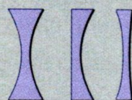
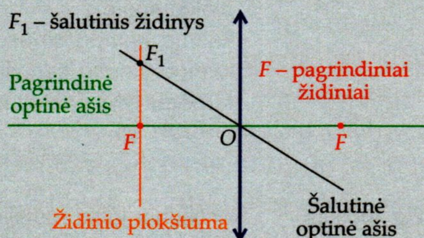
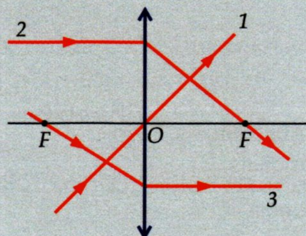
Ilgą laiką teleskopai veikė atskirai. XX a. paskutiniajame dešimtmetyje pradėti įgyvendinti teleskopų jungimo projektai. Vienas iš jų – „Very Large telescope". Išverstas pažodžiui, jis reiškia „labai didelis teleskopas". Tai keturi 8,2 m skersmens teleskopai ant 2632 m aukščio Paranãlo kalno Čìlėje. Šie keturi teleskopai sudaro ekvivalentinį 16 m teleskopą. Teleskopų savininkė – Euròpos pietinė observatorija. Ji vienija devynių valstybių: Vokietìjos, Šveicãrijos, Bel̃gijos, Olándijos, Dãnijos, Prancūzìjos, Itãlijos, Švèdijos ir Portugãlijos – astronomus.

Detalesniems stebėjimams reikia didesnių teleskopų, todėl pastaruoju metu planuojama sukurti net 100 m skersmens teleskopą reflektorių.

Atminkite, kad Saulės negalima stebėti nei plika akimi, nei tiesiogiai pro teleskopą. Tam reikia naudoti filtrus.

Skyriaus „Geometrinė optika" apibendrinimas

Optika	Fizikos mokslo dalis, nagrinėjanti šviesos reiškinius, vadinama optika.
Geometrinė optika	Geometrine optika vadinamas optikos skyrius, kuris šviesos energijos sklidimo skaidriomis terpėmis dėsnius nagrinėja remdamasis šviesos spindulio sąvoka.
Šviesos spindulys	Šviesos spinduliu vadinama linija, kuria sklinda šviesos energija.
Tiesiaeigio šviesos sklidimo dėsnis	Vienalyte terpe šviesa sklinda tiesiai.
Šviesos atspindžio dėsnis	• Krintantysis spindulys, atsispindėjęs spindulys ir per kritimo tašką nubrėžtas statmuo veidrodžio paviršiui yra vienoje plokštumoje; • atspindžio kampas lygus kritimo kampui: $\beta = \alpha$.
Šviesos lūžimas	Šviesos spindulio krypties pasikeitimas, kai jis pereina iš vienos skaidrios terpės į kitą, vadinamas šviesos lūžimu.
Šviesos lūžimo dėsnis	• Krintantysis spindulys, lūžęs spindulys ir per kritimo tašką nubrėžtas statmuo terpes skiriančiam paviršiui yra vienoje plokštumoje; • kritimo kampo sinuso ir lūžio kampo sinuso santykis dviem terpėms yra pastovus dydis: $\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n_{21}$.
Santykinis lūžio rodiklis	Santykiniu lūžio rodikliu n_{21} vadinamas antrosios terpės lūžio rodiklis pirmosios atžvilgiu: $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$; čia n_1 – pirmosios terpės absoliutusis lūžio rodiklis, n_2 – antrosios terpės absoliutusis lūžio rodiklis.
Absoliutusis lūžio rodiklis	Absoliutusis lūžio rodiklis n yra terpės lūžio rodiklis tuštumos (vakuumo) atžvilgiu.
Lęšis	Skaidrus kūnas, apribotas dviejų rutuliškųjų paviršių, vadinamas lęšiu.

Lęšių rūšys	Lęšis, kuris centre yra storesnis negu kraštuose (iškilasis), spindulius glaudžia, todėl vadinamas glaudžiamuoju lęšiu. Glaudžiamojo lęšio pavyzdžiai:  Glaudžiamojo lęšio sutartinis ženklas:  Lęšis, kuris centre yra plonesnis negu kraštuose (įgaubtasis), spindulius sklaido, todėl vadinamas sklaidomuoju lęšiu. Sklaidomojo lęšio pavyzdžiai:  Sklaidomojo lęšio sutartinis ženklas: 
Lęšį apibūdinančios sąvokos	Pagrindinė optinė ašis – tiesė, einanti per lęšio paviršių kreivumo centrus. Optinis centras – pagrindinės optinės ašies taškas *O*, per kurį eidama šviesa nelūžta. Šalutinė optinė ašis – kiekviena tiesė, einanti per lęšio optinį centrą (išskyrus pagrindinę optinę ašį). Pagrindinis židinys *F* – taškas, kuriame susikerta su pagrindine optine ašimi lygiagretūs spinduliai arba jų tęsiniai. Židinio nuotolis – atstumas *OF* nuo lęšio optinio centro iki pagrindinio židinio. Židinio plokštuma – plokštuma, einanti per lęšio pagrindinį židinį statmenai pagrindinei optinei ašiai. Laužiamoji geba *D* – fizikinis dydis, atvirkščias židinio nuotoliui: $$D = \frac{1}{F}.$$ Lęšio laužiamosios gebos matavimo vienetas yra dioptrija: $[D] = 1\ \text{m}^{-1} = 1\ \text{D}$. 
Pagrindinių spindulių sklidimas per glaudžiamąjį lęšį	Spindulys *1*, einantis per lęšio optinį centrą, nelūžta. Spindulys *2*, lygiagretus su pagrindine optine ašimi, lūžęs eina per pagrindinį židinį. Spindulys *3*, einantis per lęšio pagrindinį židinį, lūžęs sklinda lygiagrečiai su pagrindine optine ašimi. 

Pagrindinių spindulių sklidimas per sklaidomąjį lęšį	Spindulys *1*, lygiagretus su pagrindine optine ašimi, lūžęs sklinda už lęšio tokia kryptimi, kad jo tęsinys eina per pagrindinį židinį. Spindulys *2*, einantis per optinį centrą, nelūžta. Spindulys *3*, sklindantis pagrindinio židinio link, lūžęs eina lygiagrečiai su pagrindine optine ašimi.
Lęšio didinimas	Lęšio tiesiniu didinimu vadinamas atvaizdo ir daikto tiesinių matmenų santykis: $$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{\lvert f \rvert}{\lvert d \rvert};$$ čia H – atvaizdo aukštis, h – daikto aukštis, f – atstumas nuo lęšio iki atvaizdo, d – atstumas nuo lęšio iki daikto.
Plonojo lęšio formulė	Plonojo lęšio formulė sieja daikto atstumą (d) iki lęšio, atvaizdo atstumą (f) iki lęšio ir lęšio židinio nuotolį (F): $$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}.$$
Akomodacija	Akies lęšiuko gebėjimas keisti židinio nuotolį vadinamas akomodacija.
Adaptacija	Akies gebėjimas prisitaikyti prie skirtingos matomų objektų apšvietos vadinamas adaptacija.
Konvergencija	Akių gebėjimas pakreipti jų optines ašis į vieną tašką vadinamas konvergencija.
Geriausio matymo nuotolis	Mažiausias atstumas, kuriuo akis be ypatingo raumenų įtempimo gali įžiūrėti daikto detales, vadinamas geriausio matymo nuotoliu d. Normalios akies d = 25 cm.
Trumparegystė	Trumparegystė – regėjimo yda, kurią lemia tolimų daiktų atvaizdų susidarymas prieš akies tinklainę. Trumparegės akies geriausio matymo nuotolis mažesnis negu 25 cm. Trumparegystė koreguojama sklaidomaisiais lęšiais.
Toliaregystė	Toliaregystė – regėjimo yda, kurią lemia tolimų daiktų atvaizdų susidarymas už akies tinklainės. Toliaregės akies geriausio matymo nuotolis didesnis negu 25 cm. Toliaregystė koreguojama glaudžiamaisiais lęšiais.



O p t i k a





8 Banginė optika

7 skyriuje nagrinėta geometrinė optika negali paaiškinti kai kurių reiškinių, kaip antai: šviesos dispersijos, interferencijos, difrakcijos ir poliarizacijos, taip pat optinių prietaisų skiriamosios gebos ribotumo. Detaliau šviesos prigimtį, jos spinduliavimo dėsningumus ir šviesos sąveiką su medžiaga tiria optikos sritis, vadinama fizikine optika. Ji skirstoma į banginę ir kvantinę. Tai lemia sudėtinga šviesos prigimtis – jai būdingos ir dalelių, ir bangų savybės. Šiame skyriuje susipažinsite su banginės optikos pagrindais.

8.1. Šviesos prigimtis

Pagrindinės sąvokos

Šviesà,
šviesõs dalẽlė,
šviesõs bangà,
šviesõs spinduõlis.

Šviesa ir jos reiškiniai nepaprastai svarbūs žmogaus veikloje. Šviesa yra viena iš būtiniausių sąlygų gyvybei atsirasti ir egzistuoti Žemėje. Be šviesos energijos, ateinančios iš Saulės, gamtoje nevyktų gyvybiškai svarbus procesas – fotosintezė. Antra vertus, šviesa teikia žmogui svarbiausią informaciją apie jį supantį pasaulį ir Visatą. Todėl natūraliai kyla klausimas: kas yra ***šviesà***?

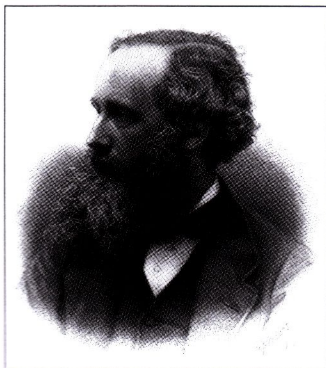
Fizikos mokslo sritis, nagrinėjanti šviesos prigimtį, jos savybes ir šviesos reiškinių dėsningumus, vadinama òptika. Šviesos prigimties problemą nuo pat jos atsiradimo pradžios sunkiai sekėsi spręsti daugelio kartų mokslininkams. Šimtmečiais buvo kuriamos, o vėliau paneigiamos įvairios hipotetinės teorijos. Pirmosios mokslinės hipotezės, kurių pagrindu bandyta aiškinti šviesos prigimtį, iškeltos analizuojant šviesos poveikio perdavimo būdus. Nustatyta, kad šviesos šaltinis, arba kitaip ***šviesõs spinduõlis***, perduoda dalį savo skleidžiamos energijos aplinkiniams kūnams (imtuvams) ir šie ją sugeria. Sugerta šviesos energija pakelia kūnų temperatūrą. Akivaizdu, kad šviesa, sklisdama iš vieno erdvės taško į kitą, perneša energiją. Tai gali vykti dviem būdais:

1) spinduolio skleidžiamų šviesos dalelių srautas patenka į imtuvą, pernešdamas medžiagą;

2) iš spinduolio sklindanti šviesos banga veikia imtuvą, nepernešdama medžiagos.

Tai buvo pagrindas atsirasti dviem skirtingoms šviesos prigimtį aiškinančioms fizikinėms teorijoms: dalẽlinei ir bangìnei. Abi jos suformuluotos XVII a. pabaigoje beveik vienu metu. Mums jau gerai žinomas anglų mokslininkas, klasikinės mechanikos kūrėjas Izaokas Niutonas (*Isaac Newton*, 1643–1727) paskelbė ***dalẽlinę šviesõs teòriją***, teigiančią, kad šviesa yra dalelių srautas. Ši teorija tuo metu lengvai paaiškino tiesiaeigį šviesos sklidimą ir atspindžio dėsningumus. Olandų fizikas ir astronomas Kristianas Heigensas pateikė ***bangìnės šviesõs teòrijos*** modelį. Pasak jo, šviesa yra ypatinga hipotetine terpe (eteriu) sklindančios bangos. Eteris užpildo visą erdvę. Jis įsiskverbia ir į pačius kūnus. Banginė teorija puikiai pagrindė šviesos lūžimo ir atspindžio dėsningumus,

Džeimsas Klarkas Maksvelas



tačiau susidūrė su tam tikrais sunkumais, aiškindama tiesiaeigį šviesos sklidimą.

Abi šviesos prigimtį aiškinančios teorijos drauge egzistavo iki XIX a. Vėliau, atradus šviesos difrakcijos, interferencijos ir poliarizacijos reiškinius, kurie būdingi tik banginiams procesams, atrodė, kad laimi banginė šviesos teorija. Šią išvadą dar labiau sustiprino Džeimso Klarko Maksvelo (*James Clerk Maxwell*, 1831–1879) hipotezė, kad šviesa yra elektromagnetinės bangos. Juo labiau, kad ją patvirtino Heinricho Herco (*Heinrich Hertz*, 1857–1894) ir Piotro Lebedevo (1866–1912) atlikti bandymai. Tačiau XX a. pradžioje Maksas Plankas (*Max Planck*, 1858–1947), Albertas Einšteinas (*Albert Einstein*, 1879–1955) ir kiti mokslininkai aptiko kvantines šviesos savybes (fotoefektą ir šviesos slėgį). Taigi dalelinės šviesos teorijos pozicijos vėl sustiprėjo.


Heinrichas Hercas

Visa tai rodo, kad šviesai būdingos ir dalelių, ir bangų savybės. Vadinasi, vienareikšmiškai atsakyti, kokia yra šviesos prigimtis, neįmanoma. Viena aišku, kad šviesa yra šviesa. Šiuo metu fizikoje paplitęs požiūris, jog šviesos prigimtis yra dvilypė. Tai vadinama bangos-dalelės dvejopumu. Su šviesos savybių dvejopumu detaliau susipažinsime nagrinėdami įvairius šviesos reiškinius. 8 skyriuje aptarsime šviesos interferencijos, difrakcijos ir poliarizacijos reiškinius, kurie aiškiai įrodo banginę jos prigimtį, o 9 skyriuje – fotoefektą, atskleidžiantį dalelinę prigimtį. Mokslas apie šviesą yra ne tik sudėtingas savo turiniu, bet ir labai įdomus dėl plataus šviesos reiškinių taikymo praktikoje.

Klausimai ir užduotys ??

1. Nusakykite prielaidas, kurios sudarė pagrindą atsirasti šviesos prigimtį aiškinančioms fizikinėms teorijoms.

2. Apibūdinkite dalelinės ir banginės šviesos teorijos modelius.

3. Kokie fizikiniai reiškiniai patvirtina šviesos prigimtį aiškinančių skirtingų modelių buvimą?

4. Šviesos savybių dvejopumas – kas tai?

5. Parenkite referatą „Svarbiausi mokslo apie šviesos raidą etapai“.

8.2. Šviesos greitis. Šviesos bangos ilgis

Pagrindinės sąvokos

Šviesõs greĩtis, šviesõs bangõs ilgis.

Šviesos greitis

Šviesõs greĩtis yra viena svarbiausių šviesos bangų sklidimo charakteristikų. Jos greičio vakuume skaitinė vertė priskiriama prie pagrindinių (vadinamųjų fundamentaliųjų) fizikinių konstantų. Ši konstanta labai svarbi praktiniu požiūriu. Tiksli šviesos greičio vertė reikalinga radijo ir šviesos lokacijoje, matuojant atstumus nuo Žemės iki kitų dangaus kūnų ir valdant kosminius aparatus. Be to, šviesos greičio eksperimentinis matavimas dviejose skirtingo tankio terpėse, pasiūlytas prancūzų fiziko Dominiko Arago (*Dominik Arago*, 1786–1853), prisidėjo pagrindžiant banginę šviesos prigimtį. Taigi kokiu greičiu sklinda šviesa?

Įjungus elektros jungiklį, lemputės šviesa mūsų akis pasiekia akimirksniu. Tai labai trumpas laiko tarpas, kurį sunku ir įsivaizduoti. Atrodytų, šviesa sklinda begaliniu greičiu. Taip ilgai manė ir senovės mokslininkai. Vienas iš pirmųjų XVI a. pabaigoje tokiu teiginiu pradėjo abejoti Galileo Galilėjus. Kiek vėliau, XVII a. antrojoje pusėje, begalinio greičio idėją paneigė Izaokas Niutonas ir Kristianas Heigensas. Galilėjus bandė nustatyti šviesos sklidimo greitį, matuodamas laiką, per kurį šviesa nueidavo apie 9,05 km tarp dviejų kalvų. Šių kalvų viršūnėse stovėjo du stebėtojai, laikydami rankose uždengiamus žibintus. Tas bandymas detaliai buvo aprašytas fizikos vadovėlyje X klasei (žr. jo p. 65). Šiandien visi suprantame, kad tokiu būdu neįmanoma gauti patikimo šviesos sklidimo greičio rezultato. Iš tikrųjų eksperimentuojant buvo matuojamas ne šviesos signalo sklidimo greitis, bet stebėtojų reakcijos laikas. Vis dėlto Galilėjaus bandymas ganėtinai svarbus, nes jis įtikino, kad šviesos greitis yra nepaprastai didelis. Pradėta manyti taip: kad šviesa sklistų pastebimą laiką, reikia pasirinkti gerokai didesnius – astronominius – atstumus.

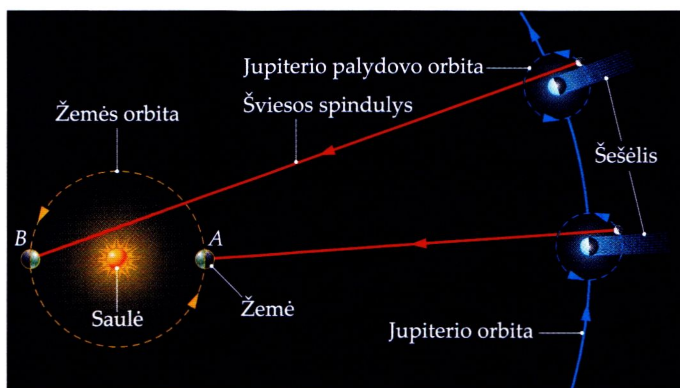
Astronominiai šviesos greičio matavimo būdai


Olas Remeris

Šviesos greitį pirmą kartą 1676 m. išmatavo danų astronomas Olas Remeris (*Olas Römer*, 1644–1710). Tyrinėdamas Galilėjaus 1610 m. atrastų Jupiterio palydovų judėjimą, jis atkreipė dėmesį į tai, kad vieno palydovo – Ijò (*Io*) – pasirodymo periodiškumas kinta. Žemės, Jupiterio ir jo palydovo Ijo orbitos yra beveik vienoje plokštumoje. Todėl Ijo periodiškai, kas 42 h 27 min 33 s, išlenda iš Jupiterio šešėlio. Tokį rezultatą Remeris gavo stebėdamas palydovo judėjimą tuo metu, kai Žemė, skriedama orbita aplink Saulę, buvo arčiausiai Jupiterio (taške *A*; 8.2.1 pav.). Žemei tolstant nuo Jupiterio, Ijo pasirodymo laiko tarpai tolygiai kito. Iš pradžių jie ilgėjo, vėliau trumpėjo, kol vėl pasiekė 42 h 27 min 33 s. Kai Žemė būdavo toliausiai nuo Jupiterio (orbitos taške *B*), Ijo pasirodydavo 22 min vėliau.

Pastebėsime, kad Ijo tariamo vėlavimo trukmė tarp abiejų gretimų jo užtemimo periodų būdavo ne ilgesnė kaip 415 s. Palydovo Ijo vėlavimo reiškinį Remeris aiškino taip: kol Žemė savo orbita pereina iš taško *A* į tašką *B*, šviesos signalui tenka nueiti papildomą kelią *AB*, lygų Žemės orbitos skersmens ilgiui. Astronominiais stebėjimais gauti rezultatai leido apskaičiuoti šviesos greitį. Remeris gavo šviesos greičio vertę c = 226 000 km/s. To meto sąlygomis tai buvo pakankamai tikslus rezultatas.

Šiuolaikiniais tikslesniais prietaisais nustatyta, kad palydovo Ijo tariamo vėlavimo trukmė, kai Žemė yra artimiausiame ir tolimiausiame (nuo Jupiterio) savo orbitos taške, lygi apie 16,5 min. Vadinasi, šviesos



8.2.1 pav.

greičio vertė yra apie 301 000 km/s. Remerio bandymas svarbus istorine prasme. Jis parodė, kad šviesos greitis yra ne begalinis, o baigtinis.

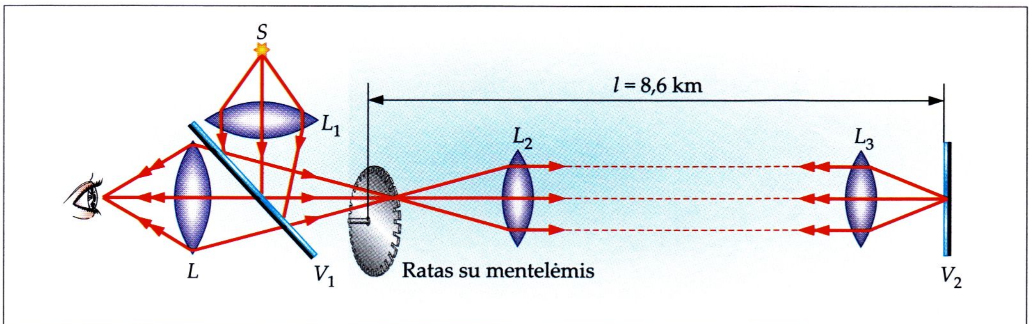
Kitą astronominį šviesos greičio matavimo būdą 1728 m. pasiūlė anglų astronomas Džeimsas Bradlis (*James Bradley*, 1692–1762). Jis pirmasis pastebėjo, kad regimosios žvaigždžių padėtys dangaus skliaute kinta atsižvelgiant į Žemės padėtį jos orbitoje aplink Saulę. Šis reiškinys buvo pavadintas ***žvaigždžių aberãcija***. Mokslininkas suprato, kad aberacijos priežastis – Žemės judėjimas. Regėjimo krypties pokyčiai susiję su Žemės judėjimo aplink Saulę ir šviesos greičių skirtumu. Remdamasis šiuo sąryšiu, Bradlis gavo skaitinę šviesos greičio vertę, kuri buvo artima Remerio apskaičiuotajai. Antra vertus, jeigu tartume, kad šviesos greitis yra žinomas, pagal žvaigždžių aberaciją galėtume nustatyti Žemės orbitinį greitį.

Laboratoriniai šviesos greičio matavimo būdai

Norint rasti šviesos greitį Žemės sąlygomis, mokslininkams reikėjo sugalvoti, kokiais būdais būtų galima tiksliai išmatuoti labai trumpus laiko tarpus, per kuriuos šviesa nueina palyginti mažus atstumus. Šviesos sklidimo greitį matuoti „žemiškais" metodais pirmasis pasiūlė jau minėtas prancūzų fizikas Dominikas Arago. Jo sumanymą 1849 m. bandymais realizavo kitas prancūzų fizikas Armanas Fizo (*Armand Fizeau*, 1819–1896).

Fizo įrenginio schema pateikta 8.2.2 paveiksle. Pagrindinis jo elementas – labai tikslus apie savo ašį besisukantis ratas su mentelėmis. Kai ratas nejudėdavo, spinduolio S skleidžiama šviesa lęšiu L_1 bū-

8.2.2 pav.



davo nukreipiama į pusiau skaidrų veidrodį V_1. Atsispindėjusi nuo jo, šviesa eidavo tarp rato mentelių ir toliau lęšiais L_2 ir L_3 būdavo nukreipiama į plokščiąjį veidrodį V_2. Šis ją atspindėdavo ir vėl nukreipdavo į ratą. Perėjusi rato mentelių tarpą, pusiau skaidrų veidrodį V_1 ir okuliarą L, šviesa patekdavo į stebėtojo akį. Atstumas tarp rato ir veidrodžio V_2 buvo lygus l = 8,6 km. Ratas turėjo 720 mentelių, o jo sukimosi kampinį greitį buvo galima parinkti tokį, kad per laiką $\Delta t = \frac{2l}{c}$ (c – šviesos greitis vakuume) ratas pasisuktų vieną žingsnį. Tada atsispindėjusi nuo veidrodžio V_2 šviesa eidavo pro gretimą mentelių tarpą. Žinodamas mentelių skaičių, rato sukimosi kampinį greitį ir atstumą l, Fizo apskaičiavo laiką Δt. Šviesos nueitą kelią $2l$ padalijęs iš laiko Δt, jis gavo tokią šviesos greičio vertę:

$$c = 313\ 300 \text{ km/s}.$$

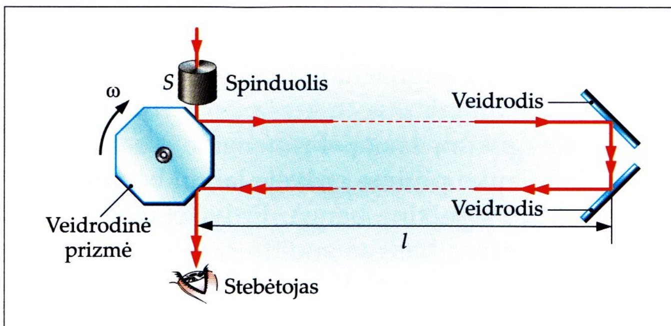


Žanas Fuko

Prancūzų fizikas Žanas Fuko (*Jean Foucault*, 1819–1868) 1862 m. šviesos sklidimo greičiui matuoti pritaikė besisukantį veidrodį. Šiuo būdu jis pirmasis išmatavo šviesos greitį ore ir vandenyje. Ore jis buvo lygus c = (298 000 ± 500) km/s, o vandenyje – mažesnis ir sudarė $\frac{3}{4}$ šviesos sklidimo greičio ore vertės. Fuko bandymas buvo svarbus papildomas argumentas, patvirtinantis banginę šviesos prigimtį.

Amerikiečių fizikas Albertas Maiklsonas (*Albert Michelson*, 1852–1931) patobulino Fizo ir Fuko šviesos sklidimo greičio nustatymo būdus ir 1926 m. pasiūlė šviesos greitį matuoti naudojant besisukančią veidrodinę aštuoniabriaunę prizmę. Bandymo įrenginys buvo sumontuotas Kalifòrnijoje (JAV), Vìlsono ir Antònijo kalnų viršūnėse, nutolusiose viena nuo

8.2.3 pav.



kitos 35,43 km atstumu. Maiklsono įrenginio schema pavaizduota 8.2.3 paveiksle.

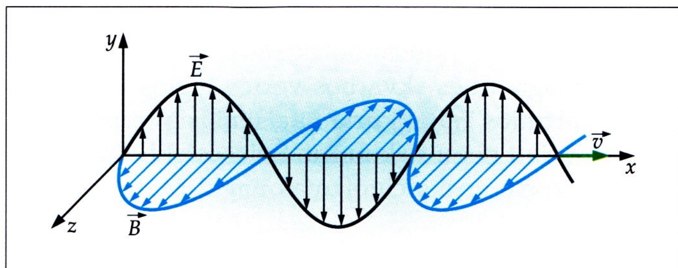
Iš spinduolio *S* (įtaisyto Vilsono kalno viršūnėje) sklindanti šviesa buvo nukreipiama į veidrodinės prizmės sienelę. Nuo jos atsispindėjusi šviesa krisdavo į Antonijo kalno viršūnėje įrengtą veidrodžių sistemą. Čia ji vėl atsispindėdavo ir grįždavo į prizmę, tačiau šį kartą krisdavo į kitą sienelę. Atsispindėjusi nuo jos, šviesa patekdavo į stebėtojo akį. Veidrodinė prizmė būdavo sukama tokiu kampiniu greičiu, kad stebėtojas visą laiką matytų spinduolio atvaizdą. Taip galėjo būti tik tada, kai per tą laiką, kol prizmė pasisukdavo $\frac{1}{8}$ karto, šviesa spėdavo nueiti kelią, lygų dvigubam atstumui tarp kalnų viršūnių. Žinodamas, per kiek laiko veidrodinė prizmė pasisuka $\frac{1}{8}$ karto ir per tą laiką šviesos nueitą kelią, Maiklsonas gavo labai tikslią šviesos greičio ore vertę c = (299 796 ± 4) km/s.

Šviesos sklidimo greičio skaitinė vertė buvo ne kartą tikslinama įvairiais būdais. 1983 m. atlikti du vienas kitą patvirtinantys bandymai. Vienu iš jų, matuojant radijo bangų ilgį, nustatyta, kad bet kokio dažnio elektromagnetinių bangų greitis vakuume yra vienodas ir lygus c = (299 792,456 ± 0,001) km/s. Ši šviesos sklidimo greičio vakuume skaitinė vertė buvo patvirtinta kitu bandymu, kuriame kaip spinduolis naudotas raudonos šviesos lazeris.

Sprendžiant praktinius uždavinius, imama suapvalinta šviesos greičio vakuume skaitinė vertė $c \approx$ $\approx$ 300 000 km/s.

Šviesos bangos ilgis

Nagrinėjant elektromagnetinius reiškinius, buvo pastebėta, kad su pagreičiu judanti elektringoji dalelė (krūvininkas) aplink save sukuria periodiškai kintantį elektromagnetinį lauką. Primename, kad elektromagnetinio lauko plitimą erdvėje laikui bėgant vadiname elektromagnètine bangà. Erdvėje sklindančias elektromagnetines bangas sudaro tarpusavyje susiję elektriniai ir magnetiniai laukai. Elektrinio lauko stiprio vektorius $\vec{E}$ ir magnetinės indukcijos vekto-



8.2.4 pav.

rius $\vec{B}$ virpa statmenai vienas kitam ir bangos sklidimo krypčiai (8.2.4 pav.).

Prisiminkime mums jau žinomą elektromagnetinių bangų skalę (žr. „Fiziką 12", pirmosios knygos 6.2 temą, p. 213). Joje įvairiausių pavadinimų elektromagnetinės bangos suskirstytos pagal bangos ilgį arba dažnį. Čia verta prisiminti škotų kilmės fiziko Džeimso Klarko Maksvelo iškeltą, o vėliau bandymais patvirtintą hipotèzę, kad šviesa yra elektromagnetinės bangos. Iš tikrųjų šviesa yra ne bet kokios, o tam tikro ilgių (ar dažnių) intervalo elektromagnetinės bangos. Regimoji šviesa, kurią junta žmogaus akys, nuo kitų elektromagnetinių bangų skiriasi tik bangos ilgiu (ar dažniu). Ji užima labai siaurą elektromagnetinių bangų skalės intervalą – nuo $0{,}39 \cdot 10^{-6}$ m iki $0{,}75 \cdot 10^{-6}$ m.

Šviesos bangą apibūdina šie parametrai: bangos ilgis λ, sklidimo greitis terpėje v (vakuume c), virpesių dažnis ν ir virpesių periodas T. Analogiškai mechaninių bangų modeliui galime užrašyti tokią ***šviesõs bangõs il̃gio*** apskaičiavimo formulę:

$$\lambda = vT. \tag{8.1}$$

Atsižvelgę į tai, kad $T = \frac{1}{\nu}$, bangos ilgį galime išreikšti taip:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}. \tag{8.2}$$

Šviesos greitį lemiantys veiksniai

Kas lemia šviesos greitį įvairiose terpėse? Maksvelas įrodė, kad elektromagnetinės bangõs (šviesa – taip pat elektromagnetinė banga) sklidimo greitis priklauso nuo terpės, kuria ji sklinda, elektrinių ir magnetinių savybių. Šias savybes nusako terpės santykìnė

dielektrinė skvarbà ε ir santykinė magnètinė skvarbà μ. Vakuume santykinės dielektrinės skvarbos ir santykinės magnetinės skvarbos vertės lygios 1. Ore jos taip pat artimos 1. Bet kuria kita skaidria terpe šviesa sklinda lėčiau negu vakuumu. Šviesos sklidimo greitis toje terpėje apskaičiuojamas pagal Maksvelo formulę $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$; čia ε ir μ – atitinkamai santykinė dielektrinė ir santykinė magnetinė skvarba. Šviesos sklidimo greitis vakuume $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$; čia ε_0 ir μ_0 – atitinkamai elektrinė ir magnetinė konstanta: $\varepsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}$ F/m, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. Neskaidriomis terpėmis šviesa nesklinda.

Klausimai ir užduotys ??

1. Išvardykite astronominius šviesos greičio matavimo būdus. Pabandykite savais žodžiais paaiškinti jų esmę.

2. Išvardykite laboratorinius šviesos greičio matavimo būdus. Pabandykite savais žodžiais paaiškinti įrenginių, naudotų šviesos greičiui matuoti, veikimą.

3. Užrašykite šviesos greičio vakuume skaitinę vertę ir ją įsidėmėkite.

4. Ką vadiname elektromagnetine banga?

5. Parašykite elektromagnetinės bangos ilgio, dažnio, periodo ir sklidimo greičio tarpusavio sąryšius.

6. Nurodykite priežastis, kurios lemia elektromagnetinės bangos sklidimo greitį įvairiose terpėse. Kaip apskaičiuoti šviesos greitį terpėje?

7. Teigiama, kad astronomai, tiriantys galaktikas, nagrinėja Visatos praeitį. Ar teisingas toks teiginys?

8. Kiek laiko šviesa sklinda nuo Saulės iki Žemės? Atstumas tarp šių dangaus kūnų lygus 150 mln. km.

(500 s)

9. Atstumas nuo Žemės iki Mėnulio lygus 384 000 km. Šviesa jį įveikia per 1,28 s. Kokiu greičiu sklinda šviesa?

($3 \cdot 10^8$ m/s)

10. Atstumą, lygų Žemės pusiaujo ilgiui, šviesa nusklinda per 0,134 s. Apskaičiuokite Žemės spindulį.

($\approx 6{,}4 \cdot 10^6$ m)

11. Parenkite referatą „Istorinė šviesos greičio matavimo raida“.

8.3. Šviesos dispersija. Vaivorykštė

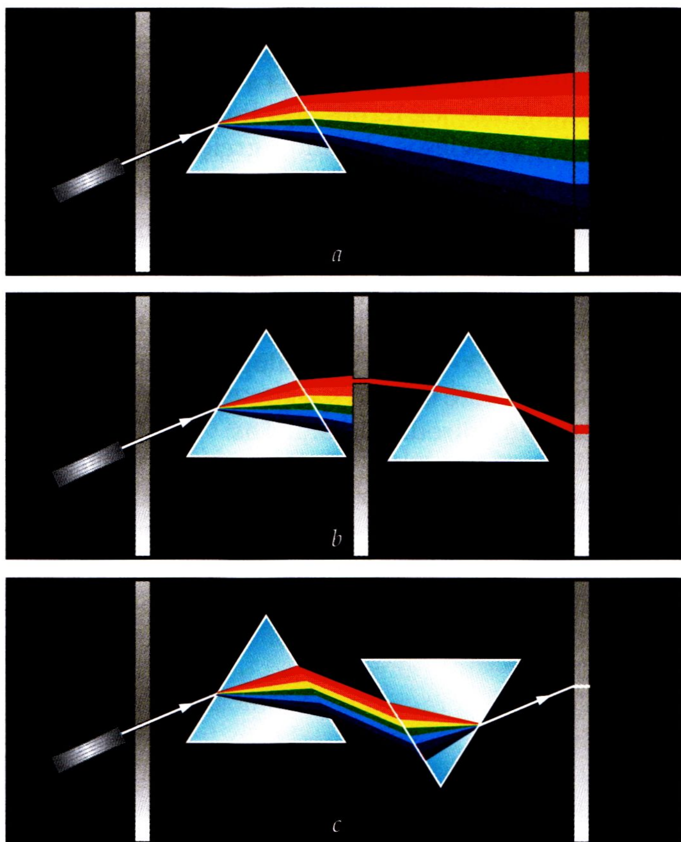
Šviesos dispersija

Mokydamiesi fizikos žemesnėse klasėse, sužinojote, kad, nukreipus siaurą baltos šviesos pluoštą į trikampę stiklinę prizmę, už jos pastatytame ekrane susidaro septynių spalvų vaivorykštės juosta. Pabandykime išsiaiškinti, kodėl baltos šviesos pluoštas suskyla į spalvotą juostą ir kokia yra spalvos prigimtis.

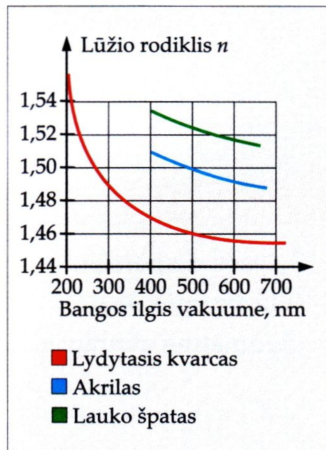
Moksliškai pagrįstą atsakymą į šį klausimą pirmasis pateikė Izaokas Niutonas. 1666 m. jis atliko genialiai paprastą, tačiau labai informatyvų bandymą, kurio schema pavaizduota 8.3.1 paveiksle. Siaurą saulės spindulių pluoštą pro mažą uždarytos langinės plyšį jis nukreipė į trikampės stiklinės prizmės vieną sie-

Pagrindinės sąvokos

Šviesõs dispèrsija, šviesõs spèktras, chromãtinė aberãcija.



8.3.1 pav.



8.3.2 pav.

nelę ir priešingoje kambario sienoje gavo ištęstos vaivorykštės spalvų atvaizdą (8.3.1 pav., *a*). Jį Niutonas pavadino ***šviesõs spektrù*** (lot. *spectrum* – vaizdinys, vaizdas). Tęsdamas bandymą, Niutonas iš gauto spektro išskyrė kiekvienos spalvos spindulių pluoštus ir nukreipė juos paeiliui tuo pačiu kampu į kitą stiklinę prizmę (8.3.1 pav., *b*). Mokslininkas pastebėjo, kad skirtingos spalvos spindulių pluoštai, eidami per prizmę, lūžta nevienodai: violetinis – labiausiai, o raudonas – mažiausiai. Be to, jis atkreipė dėmesį į tai, kad vienspalviai spinduliai, sklisdami prizme, nebesiskaidydavo į sudedamąsias dalis. Ekrane susidarydavo vienspalvė dėmė. Visus gauto spektro spindulius nukreipęs į kitą trikampę stiklinę prizmę, pasuktą 180° kampu pirmosios atžvilgiu, ekrane jis matydavo baltą dėmę (8.3.1 pav., *c*). Bandymo rezultatai leido Niutonui padaryti tokią išvadą: balta šviesa yra sudėtinė – jos pluoštas, eidamas per stiklinę prizmę, suskyla į spektrą; skirtingų spalvų spinduliai stiklinėje prizmėje lūžta nevienodai.

Pabandykime išsiaiškinti stebimo reiškinio prigimtį. Akivaizdu, kad baltos šviesos, sklindančios stikline prizme, suskilimą į spektrą lemia stiklo poveikis šviesai. Prisiminkime, jog terpės absoliutusis lūžio rodiklis n susijęs su šviesos sklidimo greičiu v toje terpėje: $n = \frac{c}{v}$; čia c – šviesos sklidimo greitis vakuume. Antra vertus, žinome, kad visų elektromagnetinių bangų, iš jų ir baltos bei monochromatinės (gr. *monos* – vienas, vienintelis, vientisas, *chrōmatikos* – spalvotas) šviesos, sklidimo greitis vakuume yra vienodas ir lygus $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s. Analogiškai galime parašyti kraštinių gauto šviesos spektro pluoštų (violetinių ir raudonų) lūžio rodiklių išraiškas:

$$n_v = \frac{c}{v_v}, \quad n_r = \frac{c}{v_r}. \qquad (8.3)$$

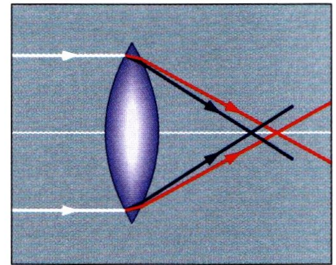
Vadinasi, įvairių spalvų spindulių, sklindančių stikline prizme, nevienodą lūžimą lemia skirtingas tų spindulių sklidimo greitis stikle. Violetinis pluoštas prizme sklinda lėčiau negu raudonas. Iš 8.3 formulių matyti, kad $n_v > n_r$. Tai rodo, kad terpės (stiklo) lūžio rodiklis priklauso nuo šviesos pluošto spalvos. 8.3.2 paveiksle parodyta, kaip priklauso lydytojo kvarco, akrilo ir lauko špato lūžio rodiklis nuo vakuume sklindančių šviesos bangų ilgio. Didėjant šviesos bangų ilgiui (mažėjant dažniui), lūžio rodiklis mažėja.

Terpės lūžio rodiklio n priklausomybė nuo šia terpe sklindančios šviesos bangos dažnio (arba ilgio) vadinama šviesõs skaidà, arba šviesõs dispèrsija (lot. *dispersio* – išsklaidymas, išbarstymas). Šviesos dispersijos reiškinys dažnai apibrėžiamas ir taip: ***šviesos dispersija yra baltos šviesos skaidymas į spektrą.***

Monochromatinės (vienspalvės) šviesos bangos spalvą nusako tos bangos (elektromagnetinės) dažnis arba ilgis. Violetinių šviesos spindulių dažnis yra didesnis negu raudonų. Todėl skirtingo dažnio (arba ilgio) monochromatinės šviesos bangos stikline prizme sklinda nevienodu greičiu.

Chromatinė aberacija

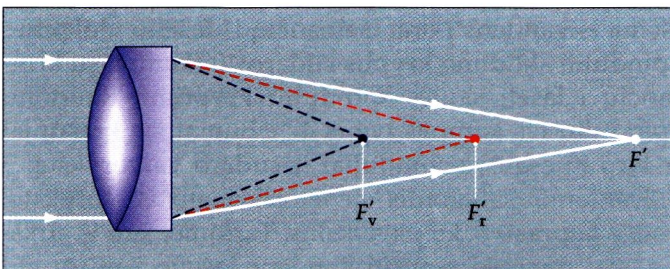
Panagrinėkime šviesos dispersijos reiškinį praktiniu aspektu.



8.3.3 pav.

Pirma, šviesos dispersija yra rimta problema, su kuria susiduria optinių prietaisų gamintojai. Lęšiai yra pagrindiniai optinių prietaisų elementai. Dėl šviesos dispersijos glaudžiamasis lęšis violetinius spindulius jo pagrindinėje optinėje ašyje surenka arčiau negu raudonus (8.3.3 pav.). Todėl pro lęšį perėjęs baltos šviesos spindulių pluoštas pasidaro spalvotas. Šis reiškinys optikoje vadinamas ***chromãtine aberãcija***. Apie jį jau buvome užsiminę 7.11 temoje.

Norint pašalinti chromatinės aberacijos poveikį, lęšiai gaminami dvigubi, t. y. sudaryti iš skirtingų rūšių stiklo. Vienas lęšis yra glaudžiamasis ir mažesnės laužiamosios gebos, kitas – sklaidomasis ir didesnės laužiamosios gebos (žr. 8.3.4 pav.). Abiejų lęšių sistema veikia kaip glaudžiamasis lęšis. Sklaidomasis lęšis, kurio lūžio rodiklis didesnis, pailgina glaudžiamojo lęšio židinio nuotolį. Violetinių spindulių židinio nuotolis (F_v') padidėja daugiau negu raudonųjų (F_r'). Atitinkamai parenkant lęšių parametrus (stiklo



8.3.4 pav.

rūšį, kreivumo spindulius), pasiekiama, kad skirtingo ilgio bangų židiniai sutaptų (atsidurtų taške *F'*). Taip kompensuojama glaudžiamojo lęšio sukelta šviesos dispersija.

Antra, šviesos dispersija plačiai taikoma prietaisuose, kuriais gaunami ir tiriami spektrai. Pagrindinė spektrinių prietaisų dalis yra stiklinė prizmė. Dėl didelės dispersijos ji gerai išskaido skirtingo ilgio šviesos bangas. Gautas spektras fotografuojamas arba stebimas. Jį analizuojant, nustatoma kiekybinė ir kokybinė medžiagų sudėtis.

Vaivorykštė

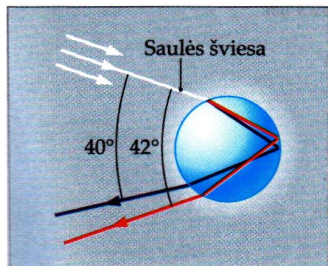


René Dekartas

Vaivorykštė yra vienas gražiausių gamtos reiškinių. Prancūzų mokslininkas René Dekartas (*Rene Descartes*, 1596–1650), remdamasis šviesos lūžimo dėsniais, pirmasis paaiškino vaivorykštės susidarymą. Nuo seno yra žinoma, kad vaivorykštę galima išvysti tada, kai vienu metu lyja lietus ir šviečia saulė. Tereikia nusisukti nuo saulės ir žiūrėti į krintančius lietaus lašelius. Vaivorykštės susidarymas aiškinamas šviesos dispersijos reiškiniu. Atskiri vandens lašeliai veikia kaip mažos skaidrios prizmės, kurios saulės spindulius išskleidžia į spektrą.

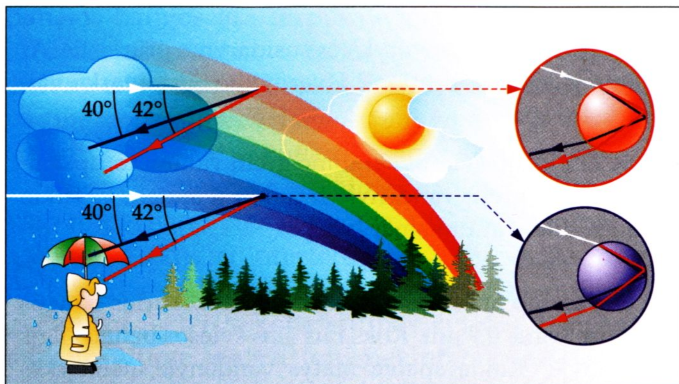
Kaip atsiranda vaivorykštė, aiškinsimės remdamiesi 8.3.5 paveikslu. Dalis saulės spindulių, krintančių į atmosferoje esantį vandens lašelį, nuo dviejų terpių (atmosferos oro ir vandens) skiriamosios ribos atsispindi, o kita dalis lūžta suskildama į spektrą. Dėl skirtingo lūžio rodiklio violetiniai spinduliai užlinksta labiau negu raudoni. Toliau sklisdami lašeliu, spinduliai pasiekia užpakalinę jo sienelę. Dalis spindulių nuo jos atsispindi, kita, mūsų nedominanti, dalis lūžta ir išeina iš lašelio.

8.3.5 pav.



Nuo užpakalinės vandens lašelio sienelės atsispindėję spinduliai pasiekia priekinę jo sienelę, čia lūžta ir išeina iš vandens į orą. Išeinančių iš lašelio violetinių spindulių sklidimo kryptis sudaro 40° kampą su krintančių į lašelį saulės spindulių kryptimi. Raudonų spindulių tas kampas lygus 42°. Būtent šie kraštiniai ir tarp jų esantys spinduliai ir sudaro vaivorykštę.

Kokiomis sąlygomis stebėtojas mato vaivorykštę, padės suprasti 8.3.6 paveikslas. Tarkime, kad iš aukščiausiai danguje esančio vandens lašelio į mūsų akį



8.3.6 pav.

patenka raudonas šviesos spindulys, kitų spalvų spinduliai, išėję iš šio lašelio, dėl skirtingų nuokrypio kampų mūsų akies nepasiekia. Tas lašelis mums atrodo raudonas. Tuo pačiu metu violetinis šviesos spindulys mus pasiekia iš žemiau danguje esančio vandens lašelio. Į mūsų akį iš kiekvieno lašelio gali patekti tik vienos spalvos šviesos spinduliai. Kitų vaivorykštės spalvų spinduliai mus pasiekia iš vandens lašelių, esančių tarp aprašytųjų. Taigi viršutinę, raudoną, vaivorykštės juostą matome 42°, o apatinę, violetinę – 40° kampu.

Kai oras skaidrus, kartais pavyksta stebėti dvigubą vaivorykštę (8.3.7 pav.). Taip atsitinka tada, kai atskiri saulės spinduliai vandens lašelyje atsispindi du kartus (8.3.8 pav.). Dėl papildomo atspindžio (iš dalies ir lūžimo) sumažėja iš vandens lašelio išėjusių spindulių intensyvumas, dėl to antroji vaivorykštė yra silpnesnė. Antra vertus, papildomas atspindys vandens lašelyje sukeičia vietomis spalvų padėtis. Taigi antrosios vaivorykštės viršutinė juosta būna violetinė, o apatinė – raudona. Ypač palankiomis gamtinėmis sąlygomis tuo pačiu metu galima matyti ir daugiau vaivorykščių.



8.3.7 pav.

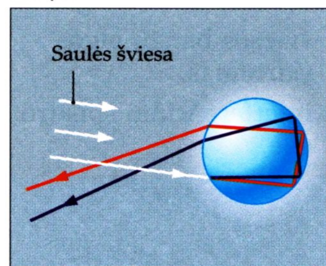
Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname šviesos dispersija?

2. Kokiais bandymais ją galima sukelti?

3. Nurodykite, kodėl baltos šviesos pluoštas, sklisdamas stikline prizme, išsiskaido į spektrą.

8.3.8 pav.



4. Paaiškinkite vaivorykštės susidarymo priežastis. Ar galima ją sukelti dirbtinai? Išvardykite eilės tvarka vaivorykštės spalvas.

5. Žinodami šviesos sklidimo greitį vakuume, apskaičiuokite jos greitį vandenyje ir stikle. Vandens ir stiklo lūžio rodiklis atitinkamai lygus $n_v = 1{,}3$, $n_s = 1{,}6$.
($2{,}3 \cdot 10^8$ m/s; $1{,}9 \cdot 10^8$ m/s)

6. Vanduo apšviestas raudona šviesa, kurios bangos ilgis ore lygus 0,7 μm. Koks bus šios šviesos bangos ilgis vandenyje? Kokią spalvą matys vandenyje atsimerkęs žmogus?
(0,53 μm)

7. Koks šviesos bangų virpesių dažnis atitinka regimosios spektro dalies kraštinius raudonus ($\lambda_r = 0{,}76$ μm) ir violetinius ($\lambda_v = 0{,}4$ μm) spindulius?
($\approx 3{,}95 \cdot 10^{14}$ Hz; $\approx 7{,}5 \cdot 10^{14}$ Hz)

8. Tam tikros šviesos bangos ilgis vandenyje 0,46 μm. Koks yra tos bangos ilgis ore?
(0,6 μm)

9. Kodėl balta šviesa, perėjusi pro lango stiklą, nesuskyla į spektrą?

10. Kodėl iš Žemės dangus atrodo melsvas, o iš Mėnulio – juodas?

8.4. Šviesos interferencija

Pagrindinės sąvokos

Šviesõs interfereñcija,
kohereñtiniai šaltìniai,
kohereñtinės bañgos,
šviesõs bangų̃ eigõs skir̀tumas,
interfereñcinio spèktro eilė̃.

Šviesos interferencijos samprata ir sąlygos

Skyriuje „Mechaniniai svyravimai ir bangos", nagrinėdami atskirų šaltinių sukeltų bangų sklidimą vandens paviršiuje, susipažinote su ***bangų̃ interfereñcija***. Taip vadinote ***dviejų arba daugiau bangų sudėtį, kai vienose erdvės srityse visą laiką stebimas sustiprėjęs, o kitose – susilpnėjęs bangavimas*** (žr. „Fiziką 11", išplėstinio kurso antrąją knygą, 7 skyriaus 7.7.4 ir 7.7.5 pav.). Analogiškas reiškinys (pojūtis) vyksta ir su garso bangomis. Prisiminkime, kad pastovų interferencinį vaizdą galima gauti tik tada, kai suside-

dančios bangos yra tarpusavyje suderintos, t. y. kai jų dažnis vienodas, o fazių skirtumas bet kuriame erdvės taške laikui bėgant pastovus. Tokios bangos vadinamos ***koherentinėmis bangomis***, o jas skleidžiantys šaltiniai – ***koherentiniais šaltiniais***.

Šviesa yra elektromagnetinės bangos. Vadinasi, jai, kaip ir mechaninėms bangoms, turi būti būdingi bangavimo reiškiniai: interferencija ir difrakcija. Ar gali du atskiri spinduoliai, kaip tai buvo mechaninių bangų atveju, skleisti koherentines šviesos bangas? Jei taip, turėtume matyti tokį nekintamą interferencinį vaizdą: vienų erdvės sričių apšvieta gerokai padidėtų, kitų – sumažėtų arba tos sritys būtų tamsios. Iš patirties žinome, kad, sudedant dviejų ar daugiau atskirų spinduolių skleidžiamą šviesą, interferencinio vaizdo gauti niekada nepavyksta. Jeigu kambaryje uždegtume daugiau elektros lempučių (ar žvakių), visų kambario sričių apšvieta padidėtų, tačiau jos maksimumų ir minimumų nematytume. Pabandę šviesos filtrais suvienodinti spinduolių (elektros lempučių) skleidžiamų šviesos bangų ilgį, interferencinio vaizdo vis tiek neišvystume. Vadinasi, galime teigti, kad bet kokie atskiri spinduoliai yra nekoherentiniai ir visada skleidžia nekoherentines šviesos bangas. Spinduolių nekoherentiškumo priežastys slypi jų sudėtyje esančiuose atomuose (molekulėse).

Kiekvienas spinduolis susideda iš daugybės atomų, o šie sužadinti spinduliuoja šviesos bangas netvarkingai, nepriklausomai vienas nuo kito. Vadinasi, tų bangų fazės tarpusavyje yra visiškai nesuderintos. Antra vertus, tas pats atomas kaskart išspinduliuoja vis kitą šviesos bangą, kurios pradinė fazė skiriasi nuo ankstesnių bangų. Tai leidžia manyti, kad bet kokie atskiri spinduoliai visada skleidžia nekoherentines bangas. Tikslumo dėlei reikėtų pastebėti, kad tarp daugybės atomų išspinduliuotų šviesos bangų gali atsirasti ir tokių, kurios klodamosi tenkins interferencijos sąlygas. Tačiau atomai spinduliuoja labai trumpai (apie 10^{-8} s), todėl interferencinis vaizdas sparčiai keičiasi ir mūsų akys nepajėgia jo sekti. Mes fiksuojame kažkokią vidutinę šviesos intensyvumo pasiskirstymo būseną.

Vis dėlto vien koherentiškumo sąlygos šviesos bangų interferencijai nepakanka. Kadangi elektromagnetinės bangos (šviesos bangos) yra skersinės, tai susi-



Tomas Jangas

dedančių bangų elektromagnetinių laukų vektoriai $\vec{E}$ turi virpėti ta pačia kryptimi, t. y. šviesos bangos turi būti poliarizuotos[1] toje pačioje plokštumoje.

Šiuo metu kaip atskiri koherentiniai spinduoliai naudojami lazeriai. Jų veikimas grindžiamas priverstiniu atomų (molekulių) spinduliavimu.

Šviesos interferencijos stebėjimo metodai

Matome, kad stebėti šviesos bangų interferenciją nėra paprasta. Sunkiausia gauti koherentines šviesos bangas. 1801 m. anglų fizikas Tomas Jangas (*Thomas Young*, 1773–1829) pirmasis atliko reikšmingą bandymą, patvirtinusį šviesos bangoms būdingą interferencijos reiškinį. Jango bandymo schema pateikta 8.4.1 paveiksle, *a*. Šviesa krinta į ekraną, kuriame yra siauras plyšys S_0. Pro jį praėjusios šviesos bangos frontas, sklisdamas toliau, pasiekia kitą ekraną, turintį vieną šalia kito du siaurus lygiagrečius plyšius: S_1 ir S_2. Šviesos bangos, sklindančios iš plyšių S_1 ir S_2, yra koherentinės, nes atsirado iš to paties bangos

[1] Apie šviesos poliarizaciją plačiau bus kalbama vadovėlio 8.9 temoje.

8.4.1 pav.

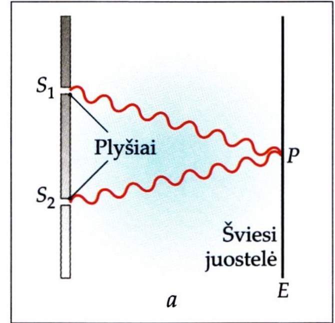
fronto. Jų dažnis (ilgis) yra vienodas, o fazė – ta pati. Vadinasi, plyšiai S_1 ir S_2 yra koherentinių šviesos bangų šaltiniai. Atsiradę nauji šviesos bangų frontai sklisdami užkloja vienas kitą ir ekrane E sukuria matomą interferencinį vaizdą. 8.4.1 paveiksle, *b*, pavaizduotos ekrane E susidariusios šviesios ir tamsios lygiagrečios juostelės.

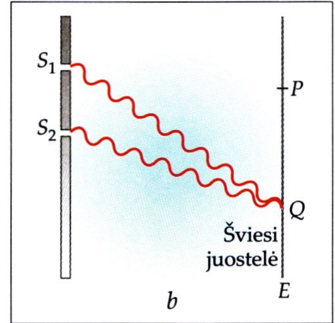
8.4.2 paveiksle pateiktos schemos padės suprasti šviesių ir tamsių juostelių susidarymą ekrane E. Tarkime, kad šviesos bangos iš plyšių S_1 ir S_2 sklinda ta pačia faze ir ekraną pasiekia taške P (8.4.2 pav., *a*). Šios bangos nueina vienodą kelią ir iki taško P atkeliauja būdamos tos pačios fazės. Vadinasi, taške P klojasi abiejų bangų keteros arba įdubos, todėl jame matome šviesią juostelę.

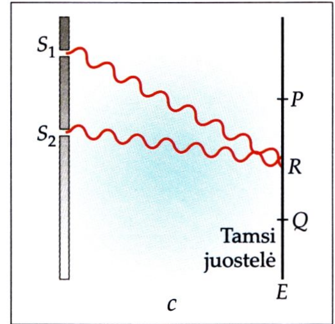
8.4.2 paveiksle, *b*, šviesos bangos iš plyšių S_1 ir S_2 taip pat pradeda sklisti ta pačia faze, tačiau iki ekrano taško Q įveikia skirtingą kelią. Viršutinės bangos jis yra vienu bangos ilgiu didesnis negu apatinės. Vienoda faze sklindančios šviesos bangos, kurių nueitų kelių skirtumas lygus vienam bangos ilgiui, ekrano taške Q sudaro gretimą šviesią juostelę.

Panagrinėkime, ką matysime ekrano taške R, kuris yra viduryje tarp taškų P ir Q (8.4.2 pav., *c*). Šiuo atveju viršutinė banga tašką R pasieks nusklidusi puse bangos ilgesnį kelią negu apatinė. Vadinasi, taške R viršutinės bangos ketera užklos apatinės įdubą. Ekrane matysime tamsią juostelę.

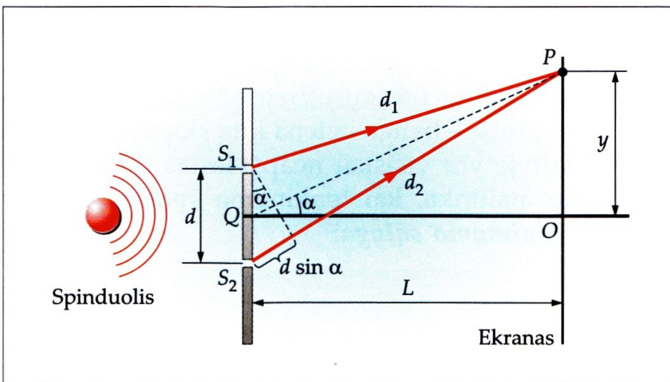
Norėdami kiekybiškai išanalizuoti Jango bandymą, nubraižykime geometrinį brėžinį (8.4.3 pav.). Šviesos pluoštai, sklindantys iš siaurų ir lygiagrečių plyšių S_1 ir S_2, išplinta, užkloja vienas kitą ir pasiekia ekraną. Jis yra lygiagretus su ekranu, turinčiu plyšius, ir nuto-







8.4.2 pav.



8.4.3 pav.

lęs nuo plyšių atstumu L. Atstumą tarp plyšių S_1 ir S_2 pažymėkime raide d. Nagrinėkime suminę bet kurio ekrano taško, pavyzdžiui, taško P, apšvietą. Nelygu, kokia yra taško P padėtis ekrane, suminė dviejų plyšių sukurta apšvieta gali kisti nuo nulio iki dvigubai didesnės nei vieno plyšio sukeltos apšvietos.

Tarkime, kad spinduolis yra vienspalvis. Tada šviesos bangos iš plyšių S_1 ir S_2 sklinda ta pačia faze, o jų dažnis (ilgis) ir amplitudė yra vienodi. Iš brėžinio matyti, kad iš plyšio S_2 sklindanti šviesos banga ekrano tašką P pasiekia nuėjusi ilgesnį kelią negu sklindanti iš plyšio S_1. ***Šviesos bangų nueitų kelių skirtumas $d_2 - d_1$ optikoje vadinamas šviesõs bangų̃ eigõs skìrtumu Δd:***

$$\Delta d = d_2 - d_1 = d \sin \alpha. \tag{8.4}$$

Kadangi $L >> d$, tai galima teigti, kad spinduliai d_1 ir d_2 yra lygiagretūs. Antra vertus, nuo šviesos bangų eigos skirtumo priklauso, kokia faze dvi bangos pasiekia ekrano tašką P. Jeigu iš plyšių S_1 ir S_2 sklindančių bangų eigos skirtumas Δd lygus nuliui arba vienam bangos ilgiui, arba sveikajam skaičiui bangos ilgių, tai bangos ateina į ekrano tašką P, būdamos tos pačios fazės. Vienos bangos ketera čia užkloja kitos keterą ar vienos bangos įduba – kitos įdubą. Šviesos bangos taške P viena kitą stiprina, todėl jo apšvieta padidėja dvigubai. Ši sąlyga vadinama ***šviesõs interfereñcijos mãksimumo są́lyga***:

$$\Delta d = d \sin \alpha = k\lambda; \tag{8.5}$$

čia k – skaičius, vadinamas ***interfereñcinio spèktro eilė̀*** ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$).

Jeigu šviesos bangų eigos skirtumas Δd lygus pusei bangos ilgio arba nelyginiam skaičiui pusbangių, iš plyšių S_1 ir S_2 sklindančios bangos ekrano tašką P pasiekia priešingomis fazėmis. Vienos bangos ketera užkloja kitos įdubą – bangos viena kitą slopina. Ekranas taško P srityje yra visiškai neapšviestas (tamsi juostelė). Taip atsitinka, kai tenkinama ***šviesõs interfereñcijos mìnimumo są́lyga***:

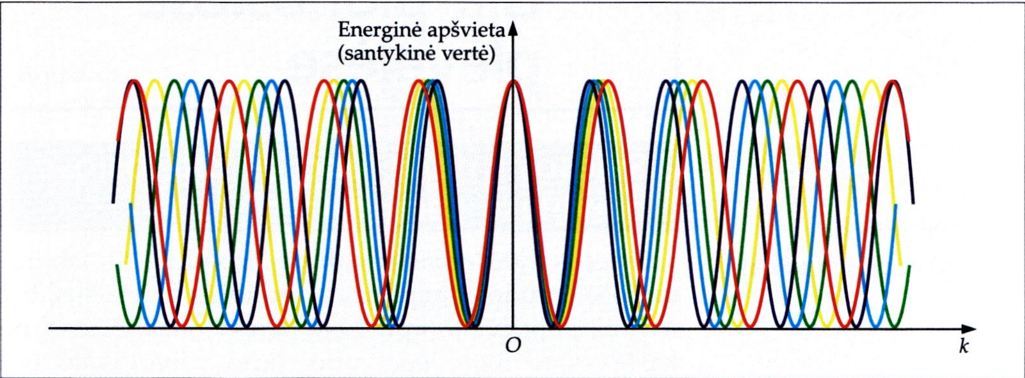
$$\Delta d = d \sin \alpha = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}; \tag{8.6}$$

čia $k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$

Kai taškas *P* leidžiasi žemyn arba kyla į viršų, šviesos bangų, sklindančių iš abiejų plyšių, eigos skirtumas jame keičiasi. Todėl taškas *P* atsiduria tai apšviestoje, tai tamsioje ekrano srityje. Tos sritys vadinamos interferencijos juostėlėmis (žr. 8.4.1 pav., *b*). Tarpinėse taško *P* padėtyse, kur šviesos bangų fazių skirtumas yra kitoks negu mūsų išnagrinėtas, suminė apšvieta kinta nuo nulio iki didžiausios vertės. Kai taškas *P* atsiduria ekrano taške *O*, turime centrinę šviesią juostelę (nulinės eilės maksimumą), atitinkančią $\Delta d = 0$ ir $k = 0$. Kai $k = \pm1, \pm2, ...$, į abi puses nuo jos išsidėsto pirmosios, antrosios ir t. t. eilės interferencijos maksimumai arba minimumai.

Jeigu spinduolis yra nevienspalvis ir iš plyšių S_1 ir S_2 sklinda balta šviesa, ekrane matomas interferencinis spektras. Tada tamsiose kurio nors ilgio šviesos bangų interferencinio vaizdo srityse išsidėsto kitokio ilgio bangų interferencijos maksimumai (8.4.4 pav.). Ekrano centre (taške *O*), kuriame tenkinama visų ilgių bangų interferencijos maksimumo sąlyga ($k = 0$ ir $\Delta d = 0$), susidaro balta juostelė rausvais pakraščiais. Gretimos šviesios juostelės yra simetriškos taško *O* atžvilgiu ($k = \pm1$), be to, vaivorykštės spalvų. Violetinė jų dalis yra arčiau centro negu raudona. Aukštesniųjų eilių spektrai vieni kitus iš dalies uždengia.

8.4.4 pav.



Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname šviesos interferencija?
2. Kas ji yra: reiškinys ar šviesos savybė?

3. Kokios šviesos bangos vadinamos koherentinėmis? Kaip jas galima gauti?

4. Parašykite šviesos interferencijos maksimumo ir minimumo sąlygas.

5. Kokius žinote būdus koherentiniams šviesos šaltiniams gauti?

6. Gaukite koherentinius šviesos šaltinius ir stebėkite šviesos interferencijos reiškinį.

7. Ar gali interferuoti dviejų elektros lempučių skleidžiamos šviesos bangos?

8. Dvi sklindančios šviesos bangos tam tikroje erdvės srityje viena kitą slopina. Kaip tuo metu pakinta šviesos bangų energija?

9. Į vieną ekrano tašką krinta du koherentiniai monochromatinės šviesos pluoštai. Jų eigos skirtumas lygus 3 μm. Sustiprės ar susilpnės tame taške šviesa, jeigu jos pluoštų bangos ilgis yra:
a) 400 nm; b) 600 nm; c) 760 nm?

8.5. Šviesos interferencija plonosiose plėvelėse

Pagrindinės sąvokos

Plonóji plėvẽlė, bangõs òptinis kẽlias.

Šviesos interferencijos plonosiose plėvelėse samprata

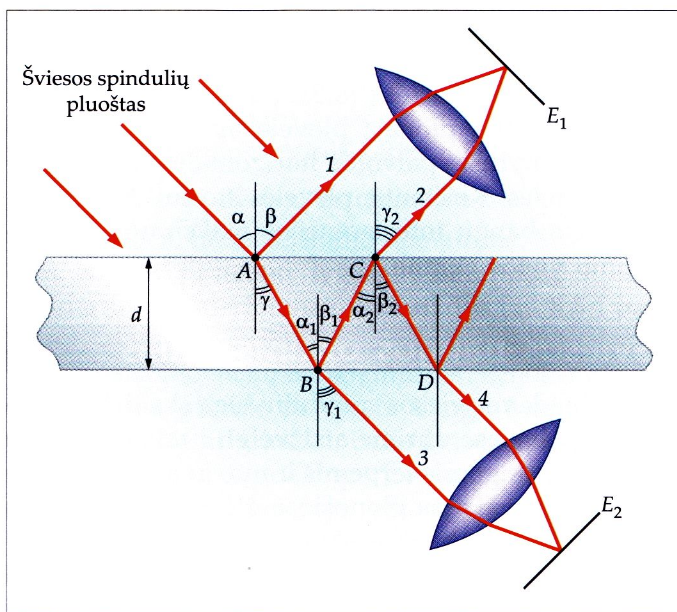
Šviesos interferenciją galima stebėti ne tik laboratorijose, naudojant specialius optinius prietaisus, bet ir mus supančioje aplinkoje. Kiekvienas iš jūsų ne kartą esate matę spalvotus tarsi vaivorykštė ore sklandančius muilo burbulus, vaivorykštės spalvomis žėrinčias plonas naftos, žibalo, riebalų ar tepalų plėveles, pasklidusias vandens ar asfalto dangos paviršiuje. Visų šių reiškinių priežastis – šviesos interferencija skaidriose plonosiose plėvelėse.

Sakykime, monochromatinis lygiagretusis pluoštas krinta į skaidrią plėvelę, kurios viršutinis ir apatinis

paviršiai yra lygiagretūs (8.5.1 pav.). Tarkime, kad abiejose plėvelės pusėse yra ta pati terpė (pavyzdžiui, oras). Pasiekusi viršutinio paviršiaus tašką *A*, šviesos banga pasidalija į dvi. Viena, atsispindėjusi nuo viršutinio plėvelės paviršiaus, eina *1* linkme, kita įsiskverbia į plėvelę ir sklinda ja. Pasiekusi apatinio paviršiaus tašką *B*, ši banga iš dalies atsispindi nuo dviejų terpių skiriamosios ribos, iš dalies lūžta. Atsispindėjusi jos dalis pasiekia plėvelės paviršiaus tašką *C* ir čia iš dalies lūžta bei atsispindi.

Taške *C* lūžusi banga išeina iš plėvelės ir sklinda *2* linkme, lygiagrečiai su pirmosios bangos sklidimo *1* kryptimi. Apatinio plėvelės paviršiaus taške *B* lūžusi šviesos banga išeina iš plėvelės ir sklinda *3* linkme. Taške *C* iš dalies atsispindėjusi banga pasiekia tašką *D*, čia vėl iš dalies atsispindi ir lūžta. Taške *D* lūžusi bangos dalis išeina iš plėvelės ir sklinda *4* linkme, lygiagrečia su *3* linkme.

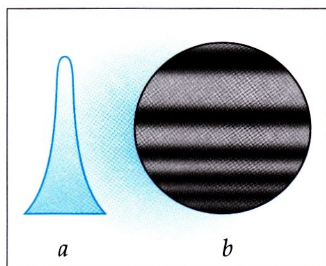
Nuo viršutinio ir apatinio plėvelės paviršiaus atsispindėjusios (*1* ir *2*) ir plėvelę perėjusios (*3* ir *4*) šviesos bangos yra koherentinės – juk jos to paties pluošto dalys. Vadinasi, šios bangos gali interferuoti. Interferencinius vaizdus (šviesias ir tamsias juosteles) matysime atitinkamos spalvos šviesai atsispindėjus nuo plėvelės paviršių (ekrane E_1) ir perėjus pro plėvelę (ekrane E_2). Interferencijos rezultatas priklausys



8.5.1 pav.

nuo krintančios šviesos bangos ilgio λ, jos kritimo į plėvelės paviršių kampo α, plėvelės storio d ir jos medžiagos lūžio rodiklio n.

Visa tai supratus, nesunku paaiškinti, kodėl plonas plėveles gamtoje matome spalvotas, nors iš tiesų jos tokios nėra. Saulės šviesa yra sudėtinė, ji susideda iš įvairaus ilgio bangų. Kai tokia šviesa apšviečia plėvelę, tose pačiose vietose susitikusios vienodo ilgio bangos viena kitą stiprina (tenkina interferencijos maksimumo sąlygą), o kitokio ilgio bangos – silpnina (tenkina minimumo sąlygą). Todėl plėvelė, žiūrint į atsispindėjusią nuo jos šviesą, žėri vaivorykštės spalvomis. Kintant regėjimo kampui, plėvelės spalvos taip pat keičiasi. Kai regėjimo kampai įvairūs, skirtingo ilgio bangų interferencijos maksimumo ir minimumo sąlygos tenkinamos skirtingose vietose. Nagrinėjama skaidri plonoji plėvelė visur yra vienodo storio.



8.5.2 pav.

Kartais skaidrios plėvelės storis gali kisti, kaip antai muilo burbulo. Vertikalaus pleišto formos plėvelę galime gauti panardindami vielos rėmelį į muilo tirpalą. Jeigu iš jo ištrauktą rėmelį palaikytume vertikalioje padėtyje, sunkio veikiamas tirpalas imtų tekėti žemyn ir muilo plėvelė palengva įgautų pleišto formą – į apačią šiek tiek sustorėtų (8.5.2 pav., *a*). Apšvietę muilo burbulą ar plėvelę monochromatine (pavyzdžiui, raudona) šviesa, matytume interferencinį vaizdą – pakaitomis išsidėsčiusias raudonas ir tamsias horizontalias juosteles. Didėjant plėvelės storiui, atstumai tarp jų mažėtų (8.5.2 pav., *b*).

Jeigu skaidrią plonąją plėvelę apšviestume balta šviesa, mainytųsi spalvotos horizontalios interferencijos juostelės. Keičiantis plėvelės storiui, kinta skirtingo ilgio bangų interferencijos maksimumo ir minimumo vietos ekrane.

Šviesos bangos optinis kelias

Nagrinėdami šviesos spindulių eigą skaidriose plonosiose plėvelėse, turime atsižvelgti į tai, kad šviesa sklinda skirtingomis terpėmis ir nuo jų atsispindi. Interferencinis vaizdas plonosiose plėvelėse gaunamas tada, kai šviesos bangos sklinda skirtingomis terpėmis. Pavyzdžiui, 8.5.1 paveiksle *1* banga sklinda tiktai oru, o *2* banga dalį kelio eina medžiaga (terpe), iš

kurios padaryta plėvelė. Norėdami suprasti, kokiomis sąlygomis ekrane E atsiranda šviesos bangų interferencijos maksimumai ir minimumai, negalime apsiriboti vien geometriniu šviesos bangų nueitų kelių skirtumu. Turime pasitelkti naują – šviesos bangų optinių kelių skirtumo – sąvoką. ***Fizikinis dydis, lygus geometrinio kelio d, kurį šviesos banga nueina kokia nors terpe, ir tos terpės absoliučiojo lūžio rodiklio n sandaugai, vadinamas bangõs òptiniu keliù s:***

$$s = dn. \tag{8.7}$$

Atsižvelgdami į tai, interferuojančių šviesos bangų optinių kelių skirtumą Δd galime išreikšti formule

$$\Delta d = n_2 d_2 - n_1 d_1; \tag{8.8}$$

čia d_1 ir d_2 – skirtingomis terpėmis šviesos bangų nueitas geometrinis kelias, n_1 ir n_2 – tų terpių absoliutusis lūžio rodiklis. Jeigu abi bangos sklinda ta pačia terpe, kurios absoliutusis lūžio rodiklis n, tai jų optinių kelių skirtumas lygus

$$\Delta d = n(d_2 - d_1). \tag{8.9}$$

Kadangi vakuumo absoliutusis lūžio rodiklis $n = 1$, tai vakuumu sklindančių šviesos bangų optinių kelių skirtumas sutampa su jų geometrinių kelių skirtumu.

Šviesos bangų atspindžio nuo skirtingų plėvelės paviršių ypatumai lemia vietą, kurioje susidaro bangų interferencijos maksimumai ir minimumai. Kai banga atsispindi nuo terpės, kurios absoliutusis lūžio rodiklis n didesnis negu tos, kuria ji sklido, bangos fazė šuoliškai pasidaro priešinga, t. y. pakinta dydžiu π. Vadinasi, bangos optinis kelias toje terpėje sutrumpėja dydžiu $\frac{\lambda}{2}$. Šviesai atsispindint nuo optiškai retesnės terpės, tokio reiškinio nematome. Šiuos pokyčius lengva pastebėti lyginant ekranuose E_1 ir E_2 susidariusius interferencinius vaizdus (žr. 8.5.1 pav.). Jeigu šviesa monochromatinė, nuo abiejų plėvelės paviršių atsispindėjusių bangų interferencijos maksimumai atitinka plėvelę perėjusių bangų interferencijos minimumus ir atvirkščiai. Balta šviesa apšviesta plėvelė, apžiūrima iš priešingų jos pusių (atsispindėjusioje ir praėjusioje šviesoje), atrodys skirtingų, tačiau viena kitą papildančių spalvų.

Gamtoje šviesos bangos nuolat sklinda skaidriomis terpėmis, lūžta pasiekusios dviejų terpių skiriamąją

ribą arba nuo jos atsispindi. Sklisdama terpe, elektromagnetinė (šviesos) banga veikia jos elektringąsias daleles (elektronus, jonus). Šios pradeda svyruoti ir skleisti antrines elektromagnetines bangas, kurių dažnis (periodas) yra toks pat kaip krintančių į terpę. Todėl fazės atžvilgiu antrinės šviesos bañgos yra tarpusavyje susijusios, vadinasi, jos koherentinės.

Žinome, kad vakuume šviesos bangos greitis lygus c, o ilgis – λ_0. Tada terpėje, kurios absoliutusis lūžio rodiklis n, šviesos bangos greitis ir ilgis bus atitinkamai lygus $v = \frac{c}{n}$ ir $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$. Banga, sumažėjus jos sklidimo terpe greičiui, sutrumpėja, tačiau jos dažnis nepakinta. Vadinasi, ***kai šviesos bangos pereina iš vienos terpės į kitą, jų sklidimo dažnis nekinta.***

Klausimai ir užduotys ??

1. Pavaizduokite šviesos spindulių eigą plonojoje plėvelėje ir paaiškinkite interferencijos reiškinį, regimą iš abiejų plėvelės pusių, t. y. ten, kur matome nuo plėvelės atsispindėjusią ir į kur perėjusią šviesą.

2. Ką vadiname šviesos bangos optiniu keliu?

3. Kai plonąją plėvelę apšviečiame lygiagrečiais baltos šviesos spinduliais, ji sušvinta vaivorykštės spalvomis. Paaiškinkite šį reiškinį.

4. Jeigu tą pačią plėvelę apšviesime lygiagrečiais monochromatinės šviesos spinduliais, matysime šviesias ir tamsias dėmes. Paaiškinkite šį reiškinį.

5. Pateikite 4 užduotyje aprašyto reiškinio taikymo praktikoje pavyzdžių.

6. Stebėkite muilo plėvelę (muilo burbulą ir plokščią plėvelę).

7. Ploną vielos rėmelį su muilo plėvele laikykite vertikaliai, o plėvelę apšvieskite monochromatine šviesa. Matysite pakaitomis išsidėsčiusius tamsius ir šviesius horizontalius ruoželius. Paaiškinkite regimą vaizdą.

8. Stebėkite šviesos interferencijos reiškinį ir kitokiose plonosiose plėvelėse.

9. Tą patį erdvės tašką pasiekia du koherentiniai šviesos pluoštai, kurių bangos ilgis 600 nm. Jų optinių kelių

skirtumas ore lygus 2 μm. Ką matysime tame taške, kai šviesos pluoštų interferencija vyks:
a) ore; b) vandenyje; c) stikle?

10. Dvi plonos tos pačios medžiagos plėvelės apšviečiamos statmenais jų paviršiui baltos šviesos pluoštais. Viena plėvelė atrodo raudona, kita – mėlyna. Kuri plėvelė yra storesnė ir kiek kartų? ($\frac{\lambda_r}{\lambda_m}$ kartų)

11. Parenkite referatą „Interferencijos plonosiose plėvelėse praktinio taikymo pavyzdžiai".

8.6. Šviesos difrakcija

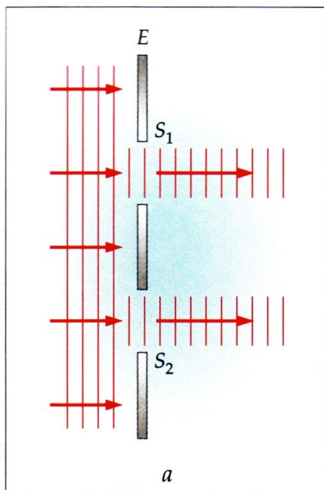
Šviesos difrakcijos reiškinio samprata

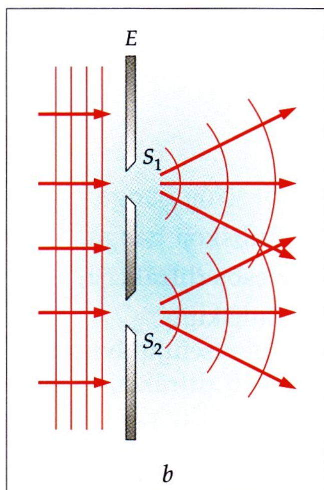
Prisiminkime Jango bandymą su dviem plyšiais. Tarkime, kad plokščioji šviesos banga krinta statmenai į neskaidrų ekraną *E*, kuriame yra du siauri lygiagretūs plyšiai S_1 ir S_2. Jeigu galioja tiesiaeigio šviesos sklidimo dėsnis, tai pro plyšius perėję spinduliai vienalyte terpe turėtų sklisti tiesiai, kaip parodyta 8.6.1 paveiksle, *a*. Jų kelyje pastatę kitą ekraną, jame matytume tam tikros formos šešėlius, kuriuos ribotų šviesos spinduliai, gebantys praeiti pro ekrano *E* plyšius. Sklindančiame šviesos pluošte visada galime rasti taškų, kuriuose elektrinio lauko stiprio $\vec{E}$ (ir magnetinės indukcijos $\vec{B}$) vertės yra vienodos. Tai taškai, kuriuos bangos pasiekia būdamos tų pačių fazių. Prisiminkime, kad paviršius, statmenas pluošto sklidimo krypčiai ir einantis per minėtus taškus, vadinamas bangos frontu. Bangos, kurių frontas vaizduojamas plokštuma, vadinamas ***plokščiõsiomis***.

Taškinio spinduolio, esančio netoli nuo stebėjimo vietos, skleidžiamų šviesos bangų frontas vienalytėje terpėje yra rutulio formos, todėl bangos vadinamos ***rùtuliškosiomis***. Pagal Heigenso ir Frenelio principą bet kuris sklindančios bangos fronto taškas kiekvienu laiko momentu yra naujas antrinių bangų šaltinis.

Pagrindinės sąvokos

Plokščióji bangà, rùtuliškoji bangà, šviesõs difrãkcija, rùtuliškųjų ir plokščiũjų šviesõs bangũ difrãkcija, Frenèlio ir Fráunhoferio difrãkcija.





8.6.1 pav.

Bangos iš jo sklinda visomis kryptimis (8.6.1 pav., *b*), taigi patenka ir į neskaidrių ekrano *E* kliūčių geometrinio šešėlio vietą. Kitaip tariant, šviesos bangos, eidamos pro plyšius S_1 ir S_2, neskaidrias kliūtis aplenkia. Tada kyla klausimas: ar apskritai ekrane gali susidaryti bent kiek ryškesnis šešėlis?

Iš tikrųjų bandymais buvo nustatyta, kad sklindanti šviesa akivaizdžiai nukrypsta nuo tiesaus kelio, ypač eidama pro labai siaurus plyšius ir mažas angas. Nuokrypiai matomi ir tada, kai apšviečiamos mažos neskaidrios kliūtys arba neskaidrių kliūčių aštrūs kraštai. Jeigu visais šiais atvejais už angų ar kliūčių pastatytume ekraną, jame matytume pakaitomis išsidėsčiusius interferencijos maksimumus ir minimumus, tačiau ryškiai besiskiriančių šviesos ir šešėlio sričių nebūtų. Pavyzdžiui, taškinio spinduolio skleidžiamos šviesos kelyje pastatykime mažą neskaidrų diską. Už jo ekrane išvysime tamsius ir šviesius koncentrinius žiedus. Labiausiai stebina tai, kad žiedų centre bus šviesi dėmė. Didinant disko skersmenį, šviesūs žiedai ims blykšti. Kai skersmens ilgis įgis tam tikrą vertę, už disko susidarys geometrinis šešėlis. Atkreipiame dėmesį į tai, kad, apšvietę dideles kliūtis ar angas, ryškios ribos tarp šviesios srities ir šešėlio niekada negausime. Būdami atidūs, visada pastebėsime pereinamąją sritį, kurioje galima aptikti silpnų šviesos interferencijos maksimumų ir minimumų. Vadinasi, šviesos bangų užlinkimas už kliūčių yra šviesos bangų sklidimą lydintis reiškinys, nors rezultatas ne visada aiškiai matomas. ***Šviesos bangų nukrypimas nuo tiesiaeigio jų sklidimo vadinamas šviesõs difrãkcija.***

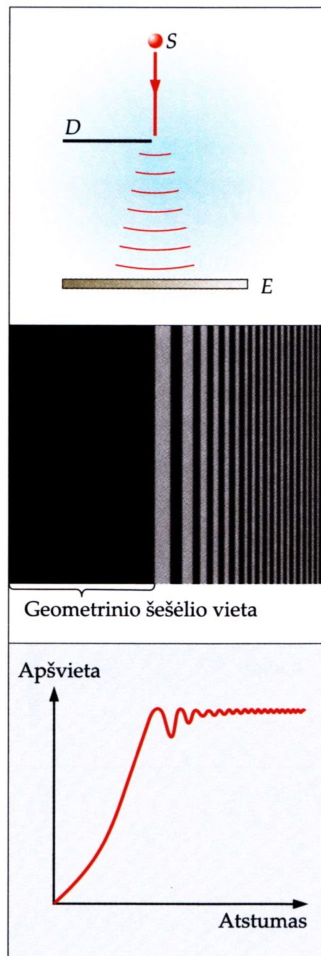
Difrakcijos pro įvairias kliūtis pavyzdžiai

Optikoje difrakcija skirstoma į dvi rūšis: ***rùtuliškųjų šviesõs bangũ difrãkciją***, arba kitaip – ***Frenèlio difrãkciją***, ir ***plokščiũjų šviesõs bangũ***, arba lygiagrečiųjų šviesos spindulių, ***difrãkciją***, t. y. ***Fráunhoferio difrãkciją***. Difrakcijos stebėjimo schemos (8.7.1 ir 8.7.2 pav.), kuriomis rėmėsi prancūzų mokslininkas Ogiustenas Frenelis (*Augustin Fresnel*, 1788–1827) ir vokiečių fizikas Jozefas Fraunhoferis (*Joseph Fraunhofer*, 1787–1826), detaliai išnagrinėtos 8.7 temoje.

1. Šviesos difrakcija pro neskaidrios kliūties kraštą. Neskaidri kliūtis *D* pastatoma tarp taškinio spinduolio *S* ir ekrano *E*. 8.6.2 paveiksle pateikta schema ir nuotrauka vaizduoja ekrane *E* regimą difrakcinį vaizdą. Jo apačioje nubraižyta teorinio apšvietos skirstinio kreivė. Stebėdami vaizdą ekrane, matome, kad ryškios skiriamosios ribos tarp šviesios srities ir geometrinio šešėlio nėra, mat dalis spindulių užlinksta už kliūties ir patenka į šešėlio vietą. Šviesioje ekrano srityje matyti pakaitomis išsidėsčiusios šviesios ir tamsios juostelės. Tamsi ekrano *E* dalis vaizduoja geometrinio šešėlio vietą. Šį reiškinį XVII a. viduryje pirmasis pastebėjo italų mokslininkas Frančeskas Grimaldis (*Fransesco Grimaldi*, 1618–1663).

2. Šviesos difrakcija per neskaidrų apskritą kūną. Neskaidrų apskritą kūną padedame šviesos spindulių pluošto kelyje. Kai kūno skersmuo yra palyginti didelis, ekrane matome taisyklingą šešėlį. Mažindami skersmenį, ekrane, kūno šešėlio centre, gauname šviesų tašką. Nuo šešėlio centro kraštų link, taip pat už šešėlio srities pakaitomis išsidėsto šviesūs ir tamsūs žiedai. Difrakcijos per neskaidrų apskritą kūną vaizdas pateiktas 8.6.3 paveiksle. Tokį vaizdą 1888 m. pirmasis stebėjo prancūzų fizikas Dominikas Arago.

Kodėl šešėlio centre atsiranda šviesus taškas, taip pat kiti žiedai, buvo paaiškinta remiantis bangine šviesos prigimtimi. Dėl difrakcijos šviesos bangos patenka į šešėlio centrą ir čia interferuoja. Jeigu jos tenkina maksimumo sąlygą, šešėlio centre matomas šviesus taškas.

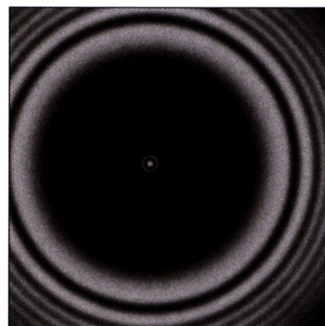


8.6.2 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname šviesos difrakcija?
2. Pateikite jos stebėjimo pavyzdžių. Paaiškinkite juos.
3. Kokiomis sąlygomis stebima šviesos difrakcija?
4. Pateikite gamtoje matomo difrakcinio vaizdo pavyzdžių.
5. Mokytojo padedami, stebėkite šviesos difrakciją nuo įvairių kliūčių.
6. Keisdami kliūčių matmenis, stebėkite, kaip kinta difrakcinis vaizdas ekrane.
7. Suformuluokite Heigenso ir Frenelio principą.

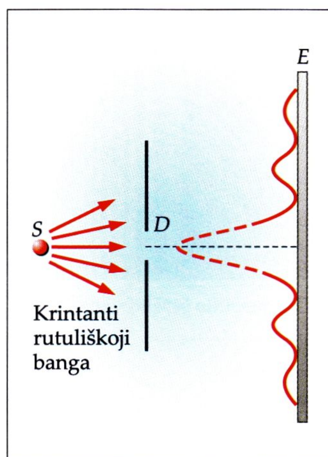
8.6.3 pav.



8.7. Frenelio ir Fraunhoferio difrakcija

! Pagrindinės sąvokos

Skiriamóji gebà.



8.7.1 pav.

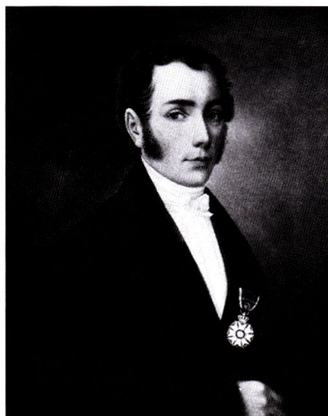
Frenelio difrakcija

Rutuliškųjų bangų, arba Frenelio, difrakciją galima stebėti tiesiogiai, nenaudojant papildomų priemonių. 8.7.1 paveiksle pateikta Frenelio difrakcijos per plyšį stebėjimo schema. Iš taškinio spinduolio *S* į stačiakampį plyšį *D* krintantys šviesos spinduliai nėra lygiagretūs. Baigtiniu atstumu nuo plyšio pastatytame ekrane *E* matomas difrakcinis vaizdas. Banguota linija prieš ekraną *E* paveiksle vaizduoja perėjusios pro plyšį *D* ir už jo užlinkusios šviesos interferencijos maksimumų santykinį šviesos intensyvumą.

Fraunhoferio difrakcija

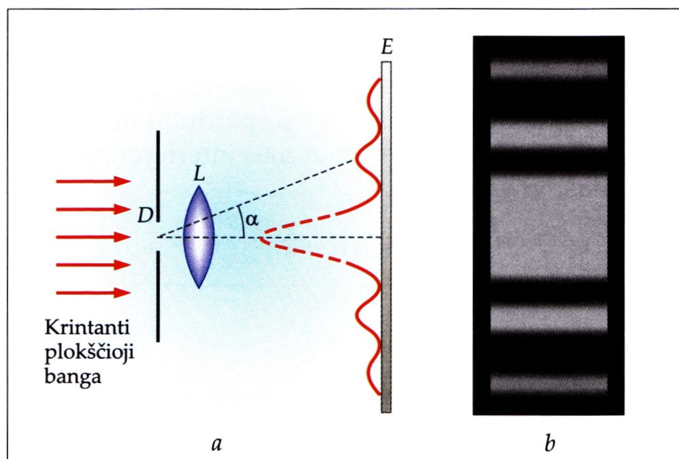
Plokščiųjų šviesos bangų, arba lygiagrečiųjų šviesos spindulių, difrakciją 1822 m. pirmasis ištyrė Jozefas Fraunhoferis. Jo bandymo schema pateikta 8.7.2 paveiksle, *a*. Lygiagretusis pluoštas krinta į siaurą plyšį *D*. Pro jį perėję spinduliai nukrypsta įvairiais kampais nuo tiesiosios krypties ir yra surenkami glaudžiamuoju lęšiu *L*, kurio židinio plokštumoje pastatomas ekranas *E*. Jame abipus intensyviausios centrinės juostelės (kurią suformuoja linkme α sklindantys spinduliai) pakaitomis išsidėsto tamsios ir šviesios juostelės. Tolstant nuo centro, juostelių intensyvumas mažėja. Fraunhoferio difrakcijos vaizdas pateiktas 8.7.2 paveiksle, *b*. 8.6.2 ir 8.6.3 paveiksle pavaizduoti difrakciniai vaizdai priskiriami Frenelio difrakcijai. Ji labiau taikoma norint kokybiškai įvertinti difrakcijos reiškinius.

Jozefas Fraunhoferis



Toliau apsiribosime vien Fraunhoferio (lygiagrečiųjų šviesos spindulių) difrakcijos analize. Ji svarbi sprendžiant praktines problemas, susijusias su optinių prietaisų veikimu. Išnagrinėsime lygiagrečiųjų šviesos spindulių, sklindančių pro siaurą stačiakampį plyšį, ekrane sukuriamo difrakcinio vaizdo prigimtį.

Sakykime, iš tolimo vienspalvio spinduolio sklindantis lygiagretusis pluoštas krinta statmenai į ekraną, kuriame yra siauras stačiakampis plyšys. Krin-



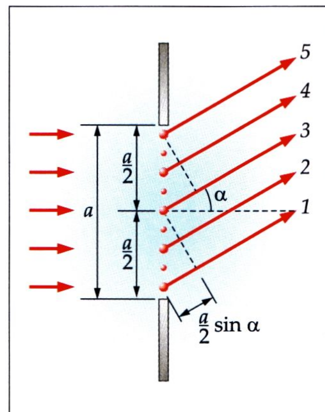
8.7.2 pav.

tančios bangos ilgis λ, plyšio plotis a. Pasiekęs plyšį, šios bangos frontas užpildo visą jo plotį (8.7.3 pav.). Pagal Heigenso ir Frenelio principą kiekvienas bangos fronto taškas virsta antrinių bangų šaltiniu. Iš jo bangos sklinda visomis kryptimis. Jos yra koherentinės ir gali tarpusavyje interferuoti. Jeigu pro plyšį einančiai šviesai galiotų tiesiaeigio jos sklidimo dėsnis, ekrane, pastatytame glaudžiamojo lęšio židinyje, būtų matomas spinduolio atvaizdas. Tačiau iš tiesų jame regime ne šviesų tašką, o pakaitomis išsidėsčiusius šviesos spindulių interferencijos maksimumus ir minimumus. Interferencijos rezultatas priklauso nuo kampo α, kuriuo sklindančios šviesos bangos nukrypsta nuo pradinės linkmės.

Patogumo dėlei padalykime plyšį pusiau. Antrinių spinduolių (bangos fronto taškų) skaičių plyšyje pasirinkime laisvai. Vienodu kampu nuo pradinės linkmės nukrypę šviesos spinduliai susirinks lęšio židinio plokštumoje, kurioje pastatytas ekranas difrakciniam vaizdui stebėti. Panagrinėkime šviesos bangas, sklindančias iš plyšio apatinio ir centrinio taško, t. y. *1* ir *3* bangą. *1* banga iki lęšio židinio plokštumos nusklinda didesnį atstumą negu *3* banga. Iš 8.7.3 paveikslo matyti, kad jų nueitų kelių skirtumas lygus $\frac{a}{2}\sin\alpha$. Toks pat jis yra tarp *2* ir *4*, taip pat tarp *3* ir *5* bangos.

Pirmiausia aptarkime, koks turi būti šviesos spindulių nuokrypio kampas α, kad ekrane matytume tamsias juosteles, t. y. interferencijos minimumus. Jeigu šviesos bangų nueitų kelių skirtumas lygus pusei

8.7.3 pav.



bangos ilgio (arba jų virpesių fazės skiriasi 180°), tai bangos klodamosi viena kitą slopina. Ekrane matome interferencijos minimumą. Vadinasi, kai plyšys padalytas pusiau, mažiausias šviesos spindulių nuokrypio kampas α, kuriuo ekrane matomas interferencijos minimumas, yra toks:

$$\frac{a}{2}\sin\alpha = \frac{\lambda}{2}.$$

Iš čia

$$\sin\alpha = \frac{\lambda}{a}.$$

Gautas interferencijos minimumas vadinamas difrakcinio vaizdo pirmõsios eilẽs mìnimumu. Visus plyšyje esančius antrinius spinduolius (o jų yra be galo daug) galima suporuoti taip, kad kampu α iš jų sklindančios šviesos bangos sąveikaudamos viena kitą slopintų.

Panašiai samprotaudami, galime teigti, kad *1* ir *2* bangos viena kitą slopins, jeigu jų eigos skirtumas bus lygus $\frac{\lambda}{2}$. Tada interferencijos minimumą ekrane matysime, kai spinduliai nukryps didesniu kampu:

$$\frac{a}{4}\sin\alpha = \frac{\lambda}{2}.$$

Iš čia

$$\sin\alpha = \frac{2\lambda}{a}.$$

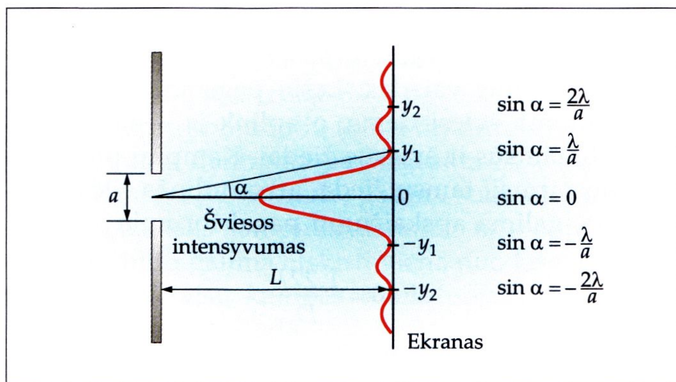
Labiau nukrypusių spindulių interferencijos minimumas vadinamas difrakcinio vaizdo antrõsios eilẽs mìnimumu. Panašiai dalydami plyšį į šešias, aštuonias ir daugiau lygių dalių, gausime vis kitas kampo α vertes, kurias atitiks difrakcinio vaizdo trečiosios, ketvirtosios ir aukštesniųjų eilių minimumai.

Apibendrindami galime padaryti išvadą, kad difrakcinio vaizdo minimumai, kurie susidaro šviesai perėjus pro siaurą stačiakampį plyšį, matomi tokiais kampais:

$$\sin\alpha = \frac{k\lambda}{a}; \qquad (8.10)$$

čia $k = 0, \pm1, \pm2, \pm3, ...$

Gauta išraiška nieko nesako apie ekrane stebimą šviesos intensyvumo kitimą. Tad panagrinėkime difrakcinio vaizdo šviesos intensyvumo priklausomybę nuo spindulių nuokrypio kampo α. Ji pavaizduota 8.7.4 paveiksle. Kai $\alpha = 0$, šviesos intensyvumas yra



8.7.4 pav.

didžiausias. Jis vadinamas nùlinės eilẽs ($k = 0$), arba centriniù, mãksimumu. Šiame taške visi plyšio elementai sukelia vienodos fazės virpesius. Abipus centrinio maksimumo išsidėsčiusios mažiau intensyvios šviesios juostelės. Atstumą tarp gretimų difrakcinio vaizdo minimumų vadinsime dėl difrakcijos tam tikru kampu užlinkusių šviesos bangų interferencijos maksimumo pločiu. Pavyzdžiui, centrinio maksimumo plotis bus lygus atstumui tarp pirmosios eilės minimumų. Pastebėsime, kad jo plotis yra dvigubai didesnis negu gretimų pirmosios eilės maksimumų.

Išnagrinėjome, kaip susidaro difrakcinis vaizdas, kai pro siaurą stačiakampį plyšį sklinda monochromatinė šviesa. Iš 8.10 formulės matyti, kad difrakcinio vaizdo visų eilių, pradedant nuo pirmosios, minimumų ir maksimumų padėtys priklauso nuo šviesos bangos ilgio λ. Dėl to, apšvietus plyšį balta šviesa, ekrane abipus centrinio maksimumo vietoj vienspalvių matomi vaivorykštės spalvų maksimumai. Tokia jų seka vadinama difrãkciniu spektrù. Nė vienas apšviesto ekrano taškas nėra visiškai tamsus. Mat skirtingo ilgio bangas atitinkantys difrakcinio vaizdo minimumai ir maksimumai ekrane užkloja vienas kitą.

Optinių prietaisų skiriamoji geba

Daugumos optinių prietaisų: fotoaparatų, filmavimo kamerų, teleskopų, mikroskopų ir kt. – angos (diafragmos), pro kurias patenka šviesa, yra apskritos. Nuo įvairių objektų sklindantys šviesos pluoštai jas pasiekia kaip plokščiosios šviesos bangos. Eidamos pro šias angas, šviesos bangos užlinksta (vyksta Fraunhoferio difrakcija). Plokščiajai monochromatinei

šviesos bangai krintant statmenai angos plokštumai, lęšio židinio plokštumoje pastatytame ekrane susidaro difrakcinis vaizdas. Lęšio pagrindiniame židinyje matoma šviesi dėmė, o aplink ją – pakaitomis išsidėstę tamsūs ir šviesūs žiedai. Kampinį plotį, atitinkantį pirmąjį tamsų žiedą, arba nulinės eilės maksimumą, galima apskaičiuoti pagal formulę

$$\sin\theta = \frac{1{,}22\lambda}{D}; \tag{8.11}$$

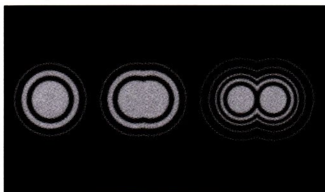
čia D – angos skersmens ilgis.

Antra vertus, difrakcijos reiškinys, vykstantis šviesai sklindant pro optinių prietaisų angas, riboja jų skiriamąją gebą. Pavyzdžiui, astronomas, stebėdamas pro teleskopą tolimą žvaigždę (taškinį spinduolį), dėl šviesos bangų difrakcijos matys ne tašką, o šviesių ir tamsių žiedų seką. Į teleskopą taip pat pateks artimesnių žvaigždžių skleidžiama šviesa, taigi dėl šviesos bangų difrakcijos atsiras papildomų šviesių ir tamsių žiedų. Jie ims dengti vieni kitus ir bus sunku pasakyti, kiek žvaigždžių šviečia. Vadinasi, astronomas turi gebėti atskirti tiriamos žvaigždės difrakcinį vaizdą nuo gretimų žvaigždžių difrakcinių vaizdų. Dėl to optinių prietaisų objektyvų angos parenkamos tokios, kad pro jas perėjusios šviesos bangos sukurtų kuo silpnesnius difrakcinius vaizdus. Taip pat naudojamos trumpesnės šviesos bangos (dažniausiai – mėlyna šviesa), t. y. lęšių paviršius padengiamas plonąja plėvele, praleidžiančia mėlyną šviesą.

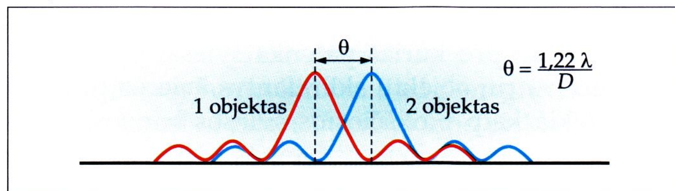
Dėl difrakcijos neįmanoma atskirti ir pro mikroskopą stebimų labai smulkių objektų arba jų dalių. Taigi ***òptinių príetaisų skìriamąją gẽbą galima apibrėžti kaip tuos prietaisus sudarančių sistemų gebėjimą išskirti atskirus objektus ar jų dalis.***

Anglų mokslininkas Džonas Viljamas Reilis (*John William Rayleigh*, 1842–1919) nustatė tokį ***skiriamõsios gebõs kritèrijų: du taškinius spinduolius (objektus) galima išskirti, jeigu vieno jų difrakcinio vaizdo***

8.7.5 pav.



8.7.6 pav.



centrinis maksimumas yra kito spinduolio difrakcinio vaizdo pirmajame minimume. Reilio skiriamosios gebos kriterijų iliustruoja 8.7.5 paveikslas. Dviejų gretimų taškinių spinduolių (objektų) difrakcinių vaizdų intensyvumo diagrama pavaizduota 8.7.6 paveiksle.

Remiantis 8.11 formule, galima sužinoti, koks turi būti mažiausias kampinis atstumas tarp objektų, kad juos dar būtų galima atskirti vieną nuo kito. Daugelio optinių prietaisų kampas θ (matuojamas radianais) yra labai mažas. Tada

$$\sin\theta \approx \theta \text{ ir } \theta = \frac{1{,}22\lambda}{D}. \qquad (8.12)$$

Klausimai ir užduotys

1. Kuo skiriasi Frenelio ir Fraunhoferio šviesos bangų difrakcijos?

2. Klasėje demonstruojama difrakcija pro įvairias kliūtis. Paaiškinkite kaskart ekrane stebimo difrakcinio vaizdo prigimtį.

3. Paaiškinkite, kokią įtaką difrakcija turi optinių prietaisų veikimui.

4. Ką vadiname optinių prietaisų skiriamąja geba?

5. Kodėl optiniu mikroskopu negalima išskirti dalelių, kurių matmenys mažesni kaip 0,3 μm?

6. Kodėl difrakcija riboja optinių prietaisų skiriamąją gebą?

7. Įrodykite, kad šviesos difrakcija nusako geometrinės optikos taikymo ribas.

8. Baltos šviesos pluoštą nukreipkite į siaurą plyšį ir ekrane stebėkite difrakcinį vaizdą.

9. Paaiškinkite, kodėl, apšvietus plyšį balta šviesa, ekrane abipus centrinio maksimumo matomi vaivorykštės spalvų maksimumai.

10. Hablio kosminiu teleskopu galima nufotografuoti 50 kartų silpnesnius ir 7 kartus tolimesnius dangaus kūnus negu geriausiais teleskopais Žemėje. Apskaičiuokite Hablio teleskopo skiriamąją gebą, kai jo veidrodžio diafragmos skersmuo yra 2,4 m ir jis veikia žalios šviesos ($\lambda_ž$ = 520 nm) srityje. ($2{,}66 \cdot 10^{-7}$ rad)

11. Parenkite referatą „Šiuolaikiniai mikroskopai ir jų skiriamoji geba“.

8.8. Difrakcinė gardelė

Pagrindinės sąvokos

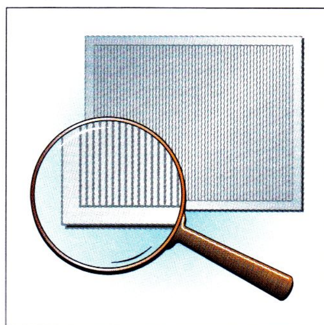
Difrãkcinė gardẽlė, difrãkcinės gardẽlės periòdas.

Difrakcinė gardelė

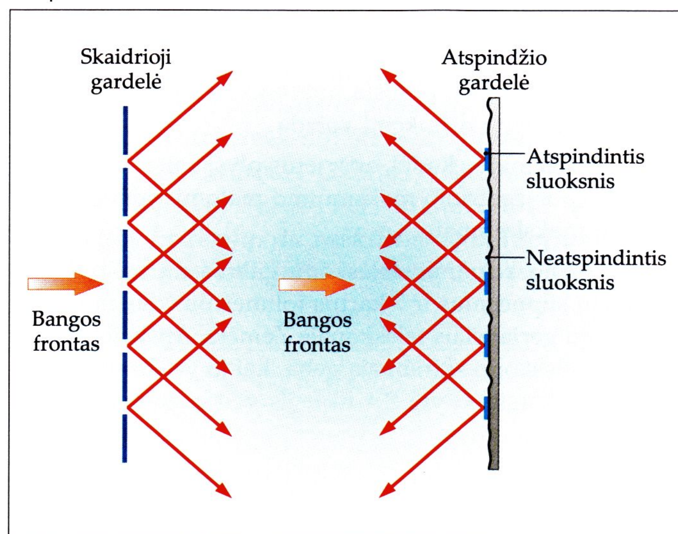
Difrãkcinę gardẽlę sudaro plokščia stiklinė arba metalinė plokštelė, kurios paviršiuje įrėžta daugybė vienodo pločio lygiagrečių rėžių. Labai kokybiškų gardelių viename milimetre jų būna iki kelių tūkstančių (8.8.1 pav.). Tarp rėžių išsidėsčiusios šviesai skaidrios arba ją atspindinčios sritys (plyšiai). Pagal tai difrakcinės gardelės skirstomos į skaidriąsias ir atspindžio gardeles (8.8.2 pav.). Skaidriosios difrakcinį vaizdą sukuria, kai šviesa pereina pro skaidrius jų plyšius. Atspindžio gardelių rėžiai padaromi metalinio veidrodžio paviršiuje. Difrakcinis vaizdas susidaro šviesai atsispindint nuo veidrodinių gardelės sričių. Tokios gardelės pavyzdys gali būti kompaktinio disko paviršius. Žiūrėdami į atsispindėjusią nuo jo šviesą, matome spektrą.

Difrakcinė gardelė naudojama spektriniuose prietaisuose elektromagnetinei spinduliuotei (šviesai) suskaidyti į spektrą. Skirtingų medžiagų spinduliuotės spektrinė sudėtis yra labai įvairi. Todėl spektrų gavimas ir analizė teikia naudingos informacijos apie tiriamos medžiagos kiekybinę ir kokybinę sudėtį. Tokiu pačiu būdu analizuojant dangaus šviesulių sklei-

8.8.1 pav.



8.8.2 pav.



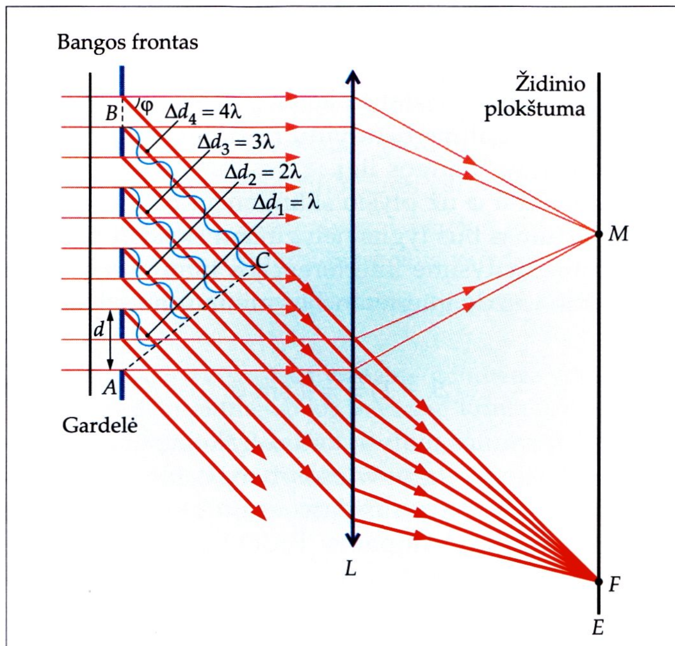
džiamą spinduliuotę, gaunama informacijos apie jų sudėtį.

Difrakcinės gardelės veikimo principą nagrinėsime remdamiesi skaidriosios gardelės pavyzdžiu. Jis yra panašus į anksčiau išnagrinėtą difrakcinio vaizdo susidarymą, kai šviesa sklinda pro siaurą plyšį. ***Skaidraus plyšio pločio a ir rėžio pločio b suma a + b = d vadinama difrãkcinės gardẽlės periodù.***

Šviesos difrakcija nuo gardelės

Tarkime, kad į difrakcinę gardelę statmenai jos paviršiui krinta plokščioji monochromatinė banga, kurios ilgis λ (8.8.3 pav.). Skaidrūs gardelės plyšiai, būdami antriniai spinduoliai, šviesos bangas skleidžia visomis kryptimis. Kadangi antriniai spinduoliai yra tos pačios bangos fronto taškai, jų spinduliuojamos bangos yra koherentinės. Lęšiu *L* nukreipę tokias bangas į ekraną *E*, jame matysime interferencinį vaizdą. Ekrano centre (taške *M*) susirinks bangos, kurių optinių kelių skirtumas lygus nuliui, todėl čia bus difrakcinio vaizdo nulinės eilės (centrinis) maksimumas. Nurodyto ilgio šviesos bangos viena kitą stiprina arba silpnina sklisdamos už plyšio keliomis kryptimis. Tuo-

8.8.3 pav.



se ekrano taškuose, kuriuose šviesos bangų optinių kelių skirtumas lygus sveikajam skaičiui bangų ilgių, matysime interferencijos maksimumus, o kuriuose nelyginiam skaičiui pusbangių – minimumus (pavyzdžiui, taške *F*). Prisiminkime, kad ore ($n_0 \approx 1$) sklindančių šviesos bangų optinių kelių skirtumas artimas jų geometrinių kelių skirtumui.

Nustatykime, kokiomis sąlygomis nuo plyšių sklindančios šviesos bangos viena kitą stiprina arba silpnina. Nagrinėkime bangas, kurios nuo tiesiosios linkmės nukrypsta kampu φ. Kaip matyti iš paveikslo, nuo gretimų plyšių tuo pačiu kampu φ sklindančių bangų optinių kelių skirtumas lygus vienam bangos ilgiui, o nuo antrinių spinduolių *A* ir *B* sklindančių bangų šis skirtumas *BC* lygus 4λ. Taigi, kai kampas φ tenkins sąlygą $\lambda = d \sin \varphi$, ekrane matysime pirmosios eilės maksimumą. Aukštesniųjų eilių maksimumus regėsime tomis kryptimis, kuriomis gretimų plyšių skleidžiamų bangų optinių kelių skirtumas bus lygus sveikajam skaičiui bangų ilgių. Vadinasi, difrakcinio vaizdo *k*-tosios eilės maksimumas susidarys, kai bangos sklis kampu φ. Interferencijos maksimumo padėtį galėsime nusakyti taip:

$$k\lambda = d \sin \varphi, \qquad (8.13)$$

arba

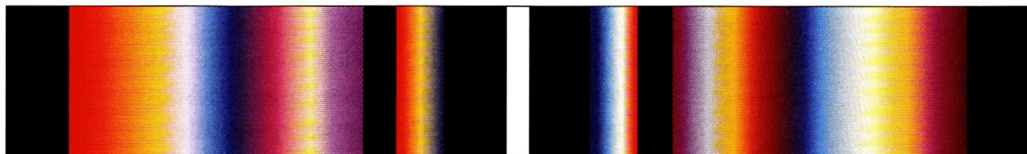
$$2k\frac{\lambda}{2} = d \sin \varphi;$$

čia *k* – interferencijos maksimumo eilė ($k = 0, \pm1, \pm2, \pm3, \ldots$). Naudodamiesi difrakcine gardele ir taikydami 8.13 formulę, galime bandymu nustatyti krintančios į gardelę šviesos bangos ilgį.

Jeigu kampu φ už plyšio sklindančių bangų optinių kelių skirtumas bus lygus nelyginiam skaičiui pusbangių, ekrane matysime interferencijos minimumą. Tada difrakcinio vaizdo interferencijos minimumo sąlyga bus tokia:

$$(2k + 1)\frac{\lambda}{2} = d \sin \varphi. \qquad (8.14)$$

Iš 8.13 formulės matyti, kad difrakcinę gardelę perėjusių skirtingo ilgio šviesos bangų interferencijos maksimumai ekrane susidaro esant skirtingiems tų bangų nuokrypio kampams. Todėl balta šviesa, krintanti į difrakcinę gardelę, išskaidoma į spektrą (8.8.4 pav.). Kiekviena šviesi juostelė (išskyrus centrinę) ekrane susideda iš visų septynių spalvų (nuo violetinės



8.8.4 pav.

iki raudonos). Abipus centrinio maksimumo išsidėsto skirtingo ilgio bangų ir įvairių eilių interferenciniai spektrai. Dėl to difrakcinė gardelė vadinama spektriniu prietaisu.

Prisiminkime spektrą, kuris susidaro, kai baltą šviesą suskaidome prizme (žr. 8.3 temą). Palyginkime jį su spektru, gautu difrakcine gardele. Difrakcinė gardelė baltą šviesą išskaido į spektrą dėl difrakcijos, o prizmė – dėl to, kad jos lūžio rodiklis priklauso nuo krintančios į ją bangos ilgio. Skiriasi ir tvarka, kuria spalvos išsidėsto difrakcine gardele ir prizme gautuose spektruose. Už gardelės sklindančių šviesos bangų nuokrypio kampas yra proporcingas bangos ilgiui, todėl ilgesnius raudonus spindulius gardelė pakreipia didesniu kampu negu trumpesnius violetinius. Prizmėje, atvirkščiai, violetiniai spinduliai lūžta labiau negu raudoni (8.3.1 pav., *a*), nes prizmės lūžio rodiklis šiems spinduliams yra didesnis.

Klausimai ir užduotys

1. Paaiškinkite difrakcinės gardelės sandarą.

2. Ką vadiname difrakcinės gardelės periodu?

3. Kokių rūšių būna difrakcinės gardelės?

4. Paaiškinkite, kodėl, šviesai perėjus pro difrakcinę gardelę, ekrane susidaro difrakcinis vaizdas.

5. Paaiškinkite, kuo difrakcinis spektras skiriasi nuo dispersinio.

6. Difrakcinės gardelės viename milimetre yra 250 rėžių. Į gardelę statmenai jos paviršiui krinta 0,5 μm bangos ilgio šviesa. Apskaičiuokite:

a) difrakcinės gardelės periodą; (4 μm)

b) kurios didžiausios eilės spektrą galima gauti šia gardele. (8-osios eilės)

7. Parenkite referatą „Difrakcijos reiškinio taikymas moksle ir praktikoje".

Mokomės spręsti uždavinius

Difrakcinė gardelė, kurios viename milimetre yra 5 rėžiai, apšviečiama 0,6 μm ilgio šviesos banga. Kokiu kampu nukrypsta šviesos spinduliai, sudarantys antrosios eilės spektrą?

φ – ?	$d = \frac{1}{5}$ mm = 0,2 mm = $0{,}2 \cdot 10^{-3}$ m
	λ = 0,6 μm = $6 \cdot 10^{-7}$ m
	$k = 2$

Sprendimas

Pagal difrakcinės gardelės formulę (8.13)

$$d \sin \varphi = k\lambda.$$

Iš čia išreiškiame kampą φ:

$$\sin \varphi = \frac{k\lambda}{d},$$

$$\varphi = \arcsin \frac{k\lambda}{d}.$$

Įrašę dydžių vertes, gauname:

$$\varphi = \arcsin \frac{2 \cdot 6 \cdot 10^{-7}\,\text{m}}{0{,}2 \cdot 10^{-3}\,\text{m}} = 6 \cdot 10^{-3}\ \text{rad}.$$

Atsakymas: $\varphi = 6 \cdot 10^{-3}$ rad.

Užduotys savarankiškam darbui

1. Atlikite bandymą. Nukreipkite į difrakcinę gardelę baltos šviesos pluoštą ir ekrane gaukite difrakcinio spektro vaizdą. Kodėl centrinėje jo dalyje visada matoma balta juosta?

2. Kaip keisis difrakcinio spektro vaizdas, tolinant ekraną nuo gardelės?

3. Pabandykite atlikti tokį bandymą. Uždaroje kameroje su maža skylute gaukite bet kokio daikto atvaizdą. Mažindami skylutę, pastebėsite, kad atvaizdas iš pradžių ryškėja, paskui ima blankti. Paaiškinkite kodėl.

4. Į difrakcinę gardelę statmenai krinta violetinės šviesos spinduliai, kurių bangos ilgis 0,45 μm. Gardelės periodas 2 μm. Apskaičiuokite:

a) kiek rėžių yra difrakcinės gardelės viename milimetre;

b) kurios didžiausios eilės spektrą galima stebėti šia gardele; (ketvirtosios eilės)

c) kokiu kampu nukrypsta šviesos spinduliai, sudarantys trečiosios eilės spektrą? (≈ 42,5°)

5. Kokio bangos ilgio linija, priklausanti trečiosios eilės difrakciniam spektrui, sutampa su ketvirtosios eilės spektro linija, kurios bangos ilgis 0,49 μm? (0,653 μm)

6. Į difrakcinę gardelę, kurios periodas $1{,}3 \cdot 10^{-5}$ m, statmenai krinta monochromatinė šviesa. Apskaičiuokite jos bangos ilgį, kai kampas tarp antrosios ir trečiosios eilės spektrų lygus 2°30′. (≈ 0,52 μm)

7. Difrakcinės gardelės periodas 8 μm. Ekranas įtaisytas lygiagrečiai su gardele už 2,5 m nuo jos. Į gardelę statmenai krinta monochromatinė šviesa, kurios bangos ilgis 0,42 μm. Koks atstumas yra tarp centrinės ir pirmosios eilės spektro linijų? (0,13 m)

8.9. Šviesos poliarizacija

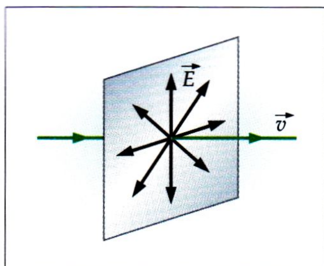
Pagrindinės sąvokos

Natūralióji bangà, poliarizúotoji bangà, šviesõs poliarizãcija, poliarizãtorius, analizãtorius.

Išnagrinėti interferencijos ir difrakcijos reiškiniai neabejotinai įrodo banginę šviesos prigimtį. Mechaninių bangų interferencija ir difrakcija būdinga tiek skersinėms, tiek išilginėms bangoms. Kokios yra šviesos bangos: skersinės ar išilginės? Jau užsiminėme, kad jos yra skersinės. Pabandykime tai pagrįsti.

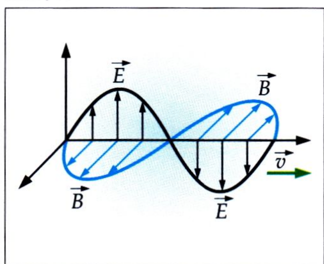
Mums padės šviesos poliarizacijos (pranc. *polarisation*, kil. iš gr. *polos* – ašigalis) reiškinys. Apskritai poliarizacija suprantama kaip virpesiai, vykstantys skersinėje bangoje tam tikromis kryptimis. Poliarizacija yra būdinga tik skersinėms bangoms. Skersinė banga, kurioje virpesiai vyksta visomis kryptimis, statmenomis jos sklidimo krypčiai, vadinama ***natūraliąja***, arba ***nepoliarizúotąja***. Kai virpesiai vyksta viena apibrėžta kryptimi (arba vienoje plokštumoje), banga vadinama ***poliarizúotąja***, tiksliau, ***tiẽsiškai poliarizúota***.

Įprastinių šviesos šaltinių atomai (arba molekulės) atskirai vieni nuo kitų tuo pačiu metu išspinduliuoja



8.9.1 pav.

8.9.2 pav.

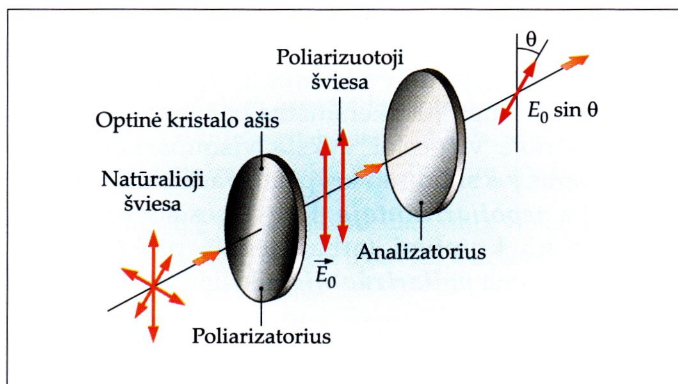


daugybę elektromagnetinių (šviesos) bangų. Jas sudarantys elektrinio lauko stiprio $\vec{E}$ ir magnetinės indukcijos $\vec{B}$ vektoriai virpa visomis galimomis kryptimis, statmenomis šviesos bangų pluošto sklidimo krypčiai (8.9.1 pav.). Tokia šviesa yra natūralioji, arba nepoliarizuotoji. Šviesos banga, kurios elektrinio lauko stiprio vektorius $\vec{E}$ (taip pat ir magnetinės indukcijos vektorius $\vec{B}$) virpa vienintele kryptimi (vienoje plokštumoje), yra tiesiškai poliarizuota (8.9.2 pav.), o tokios bangos išskyrimas iš natūraliosios šviesos įvardijamas kaip ***šviesõs poliarizãcija***. Aiškumo ir paprastumo dėlei, norint nusakyti virpesių kryptį elektromagnetinėje (šviesos) bangoje, apsiribojama tik elektrinio lauko stiprio vektoriaus $\vec{E}$ virpesių kryptimi.

Šviesos bangų pluoštą galima poliarizuoti leidžiant jį pro turmalìno kristalą arba plona herapatìto kristalo plėvele padengtą stiklo plokštelę. Poliarizuotoji šviesa taip pat gaunama, kai natūralioji šviesa iš dalies atsispindi ir lūžta sklisdama pro dviejų dielektrikų skiriamąją ribą arba du kartus lūžta pereidama islandiškojo špato kristalą.

Atlikime bandymą, poliarizuodami šviesą vienu iš tų būdų. Mums prireiks turmalino kristalo, turinčio simetrijos ašį ir pasižyminčio savybe praleisti šviesos bangas, kurių elektrinio lauko stiprio vektorius $\vec{E}$ (ir magnetinės indukcijos vektorius $\vec{B}$) virpa tik vienoje plokštumoje. Imkime stačiakampę šio kristalo plokštelę, išpjautą taip, kad viena jos siena sutaptų su optine kristalo ašimi. Į ją statmenai nukreipkime įprasto šaltinio (elektros lemputės, žvakės ir pan.) skleidžiamą natūraliosios šviesos pluoštą (8.9.3 pav.). Sukime plokštelę, vadinamą ***poliarizãtoriumi***, apie ašį, lygia-

8.9.3 pav.

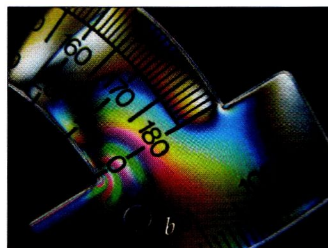


grečią su krintančiu šviesos pluoštu. Stebėdami pro plokštelę perėjusią šviesą, jokių jos intensyvumo pokyčių nematome. Vadinasi, natūralioji šviesa yra visiškai simetriška sklidimo krypties atžvilgiu. Tačiau dėl minėtos turmalino kristalo savybės pro jį perėjusių šviesos bangų vektoriaus $\vec{E}_0$ virpesių kryptis bus lygiagreti su optine kristalo ašimi. Taigi šviesa už plokštelės bus visiškai poliarizuota. Tuo įsitikinsime, jos sklidimo kelyje lygiagrečiai su pirmąja plokštele padėję antrą tokią pat turmalino kristalo plokštelę, vadinamą ***analizãtoriumi***. Sukdami ją pirmosios atžvilgiu, pastebėsime, kad pro abi plokšteles perėjusios šviesos intensyvumas ima kisti. Kai plokštelių optinės ašys yra lygiagrečios ($\theta = 0°$ arba $\theta = 180°$), intensyvumas būna didžiausias. Kampui θ tarp ašių didėjant, perėjusios šviesos pluošto intensyvumas pradeda mažėti. Kai ašys yra statmenos ($\theta = 90°$), jis pasidaro lygus nuliui (šviesa visiškai nepraeina). Tai rodo, kad šviesos pluoštas, perėjęs pirmąją turmalino kristalo plokštelę (poliarizatorių), tikrai yra tiesiškai poliarizuotas ir neturi ašinės simetrijos. Vadinasi, šviesos poliarizacija patvirtina, kad šviesa yra bangos, be to, skersinės.

Poliarizuotoji šviesa taikoma įtempimams, atsirandantiems mašinų detalėse ir įvairiose konstrukcijose (8.9.4 pav.), taip pat medicinoje gyvųjų organizmų audiniams tirti. Poliarizaciniai filtrai sumažina šviesos intensyvumą ir padeda išvengti pašalinių atspindžių nuo kompiuterio ekrano. Poliarizuotosios šviesos veikimu pagrįsta nešiojamųjų kompiuterių monitorių konstrukcija (prisiminkite XI klasėje nagrinėtą temą „Skystieji kristalai ir jų naudojimas").


a

8.9.4 pav.



b

Klausimai ir užduotys

1. Paaiškinkite, kuo natūralioji šviesa skiriasi nuo poliarizuotosios.

2. Kokią reikšmę šviesos poliarizacija turi aiškinant šviesos prigimtį?

3. Kas yra šviesos poliarizacija: šviesos reiškinys ar jos savybė?

4. Kokie prietaisai padeda įsitikinti, kad šviesa yra poliarizuota?

5. Pateikite šviesos poliarizacijos taikymo praktikoje pavyzdžių.

8.10. Eksperimentinė banginė optika

Šviesos bangos ilgio matavimas

Jango bandymą su dviem plyšiais galima panaudoti šviesos bangos ilgiui matuoti. Remdamiesi 8.4.3 paveikslu, išveskime formules atstumui tarp šviesių ir tamsių interferencijos juostelių apskaičiuoti. Sakykime, kad atstumas d tarp plyšių S_1 ir S_2 yra apie 1 mm, o ekranas nutolęs nuo plyšių atstumu L, ne mažesniu kaip 1 m (taigi $L >> d$). Tada ekrano taškas O, vienodai nutolęs nuo plyšių S_1 ir S_2, bus centrinės šviesios juostelės viduryje. Atstumu y nuo jo gretimos šviesios juostelės ($k = \pm 1$) centre pažymėkime tašką P. Tokiomis sąlygomis kampas α yra mažas, todėl $\sin\alpha \approx \operatorname{tg}\alpha$. Iš trikampio POQ išplaukia, kad

$$\sin\alpha \approx \operatorname{tg}\alpha = \frac{y}{L}. \tag{8.15}$$

Pasinaudoję interferencijos maksimumo sąlyga (8.5), šviesių juostelių padėtį taško O atžvilgiu galime nustatyti taip:

$$y_{\text{švies}} = \frac{\lambda L}{d} k. \tag{8.16}$$

Ekrane pasirenkame atitinkamos eilės k interferencijos juostelę, išmatuojame atstumą y iki ekrano taško

O ir atstumą L. Žinodami (arba išmatavę) atstumą d tarp plyšių S_1 ir S_2 ir remdamiesi 8.16 lygybe, apskaičiuojame šviesos bangos ilgį λ:

$$\lambda = \frac{y_{\text{švies}} d}{kL}. \qquad (8.17)$$

Analogiškai pasinaudoję interferencijos minimumo sąlyga (8.6), galime sužinoti tamsių juostelių padėtį ekrane taško O atžvilgiu:

$$y_{\text{tams}} = \frac{\lambda L(2k+1)}{2d}. \qquad (8.18)$$

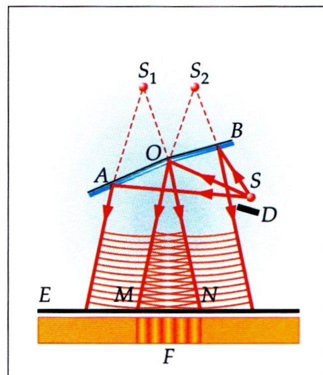
Frenelio veidrodžiai

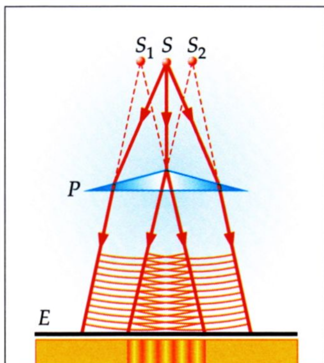
Koherentines šviesos bangas galima gauti Frenèlio véidrodžiais. Juos 1816 m. sukonstravo prancūzų fizikas Ogiustenas Frenelis. Tai du plokštieji veidrodžiai A ir B, sudėti taip, kad jų plokštumos sudaro kampą, artimą 180°. Ekraną E nuo tiesioginės taškinio spinduolio S šviesos saugo neskaidri pertvara D. Spinduolio S šviesa, atsispindėjusi nuo veidrodžių, išsiskaido į du koherentinius pluoštelius (8.10.1 pav.). Sklisdami jie vienas kitą užkloja ir krinta į ekraną E. Srityje MN matomas interferencinis vaizdas, sudarytas tarsi iš koherentinių spinduolių S_1 ir S_2 sklindančių šviesos bangų. Iš tikrųjų S_1 ir S_2 yra ne spinduoliai, o tik menamieji spinduolio S atvaizdai veidrodžiuose A ir B.

Interferencijos rezultatas pasirinktame ekrano taške F priklauso nuo šviesos bangos ilgio λ ir bangų, sklindančių nuo menamųjų spinduolių S_1 ir S_2 iki ekrano taško F, eigos skirtumo Δd. Menamųjų spinduolių S_1 ir S_2 pradinės virpesių fazės yra vienodos, tačiau skiriasi nuo spinduolio S pradinės fazės dydžiu π (kai šviesa atsispindi nuo veidrodžių arba kitos optiškai tankesnės terpės, jos fazė pakinta dydžiu π).

Bandymą galima atlikti ir su balta šviesa. Jos interferencijos maksimumus sudarys vaivorykštės spalvų juostos. Kiekvienos jų violetinis kraštas bus arčiau ekrano centrinio taško negu raudonas. Ekrano centre, kuriame visų šviesos bangų optinių kelių skirtumas lygus nuliui, matysime baltą juostelę (nulinės eilės interferencijos maksimumą), o abipus jos – tik keletą interferencijos juostelių, atitinkančių mažas k vertes. Tolimesnės juostelės viena kitą užklos ir interferencinis vaizdas išnyks.

8.10.1 pav.

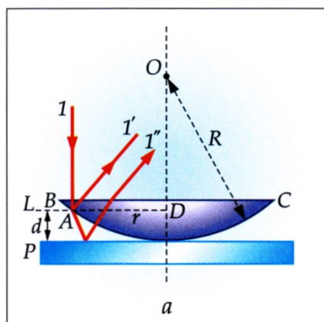


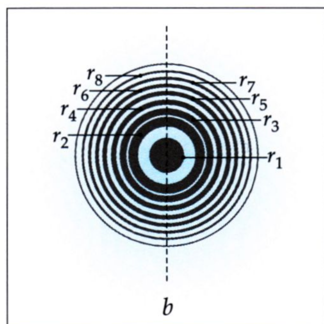


8.10.2 pav.

Frenelio biprizmė

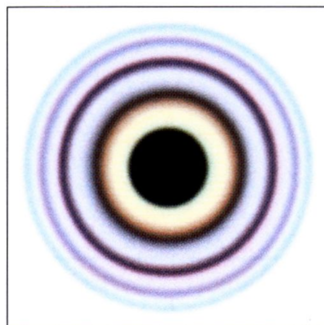
Šviesos interferencijai stebėti naudojama Frenèlio biprìzmė. Ją sudaro dvi vienodos pagrindais suglaustos stiklinės prizmės, kurių labai maži laužiamieji kampai (8.10.2 pav.). Spinduolio *S* skleidžiamą šviesos pluoštą Frenelio biprizmė suskaido į du koherentinius pluoštus, sklindančius tarsi iš menamųjų koherentinių spinduolių S_1 ir S_2. Perėję prizmes, jie kloja vienas kitą ir ekrane *E* sudaro interferencinį vaizdą. Jei šviesa monochromatinė, ekrane pakaitomis išsidėsto šviesios (tos spalvos, kurią skleidžia spinduolis *S*) ir tamsios juostelės, jei balta – vaivorykštės spalvų juostelės.





8.10.3 pav.

8.10.4 pav.



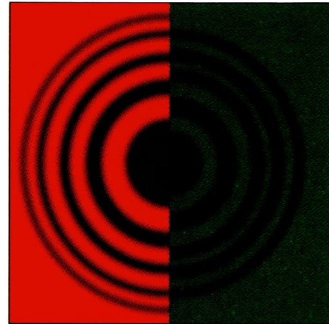
Niutono žiedai

Šviesos interferenciją galime stebėti padėję plokščiai iškilą stiklinį lęšį (kurio didelis kreivumo spindulys *R*) iškiluoju paviršiumi ant stiklinės plokštelės *P* (8.10.3 pav., *a*). Tarp plokštelės ir iškilosios lęšio dalies susidaro plonas oro sluoksnis. Jo storis *d* priklauso nuo taško *A* padėties taško *D* atžvilgiu ir nusakomas spindulio ilgiu *r* = *AD*.

Tarkime, kad statmenai plokščiajam lęšio paviršiui *BC* krinta lygiagretusis pluoštas. Susidariusį vaizdą stebėsime iš lęšio plokščiojo paviršiaus pusės ir iš plokštelės *P* pusės. Jeigu šviesa yra monochromatinė, iš lęšio plokščiojo paviršiaus pusės lęšio ir plokštelės sąlyčio srityje regime tamsią dėmę (8.10.3 pav., *b*), o aplink ją – pakaitomis einančius šviesius ir tamsius žiedus. Iš plokštelės pusės vaizdas yra atvirkščias: centrinė šviesi dėmė yra apjuosta tamsaus žiedo, o toliau pakaitomis išsidėstę šviesūs ir tamsūs žiedai. Žiedų plotis ir šviesos intensyvumas, tolstant nuo centrinės dėmės, mažėja.

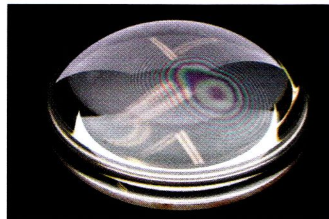
Lęšį apšvietę balta šviesa, matysime keletą vaivorykštinių žiedų (8.10.4 pav.). Kiekvieną jų sudarantys spalvoti žiedai išsidėstys taip, kad jų spinduliai ilgės einant nuo violetinio žiedo krašto iki raudono. 8.10.5 paveiksle pavaizduota raudono ir žalio žiedo padėtis vaivorykštiniame žiede ($r_r > r_ž$). Šį vaizdą pirmasis stebėjo Izaokas Niutonas, todėl jis vadinamas Niùtono žiedaĩs. Niutono žiedų susidarymas aiškinamas šviesos interferencijos reiškiniu. Statmenai lęšio

plokštumai krintantis šviesos pluoštas pasidalija į dvi dalis (8.10.3 pav., *a*). Viena dalis (*1'*) atsispindi nuo lęšio kreivojo paviršiaus ir oro sandūros, kita (*1''*) – nuo oro ir stiklinės plokštelės sandūros. Šviesos bangos *1'* ir *1''* yra koherentinės. Jų optinių kelių skirtumas lemia aprašyto interferencinio vaizdo susidarymą. Oro sluoksnio tarp lęšio kreivojo paviršiaus ir stiklinės plokštelės storis visuose taškuose, vienodai nutolusiuose nuo lęšio optinės ašies, yra vienodas, todėl šviesos bangų *1'* ir *1''* optinių kelių skirtumas nekinta. Vadinasi, šios bangos interferuoja ir susidaro šviesūs bei tamsūs koncentriniai žiedai. Interferencijos juostelės, atitinkančios vienodą terpės sluoksnio storį, optikoje vadinamos vienódo stõrio juostẽlėmis.



8.10.5 pav.

Niutono žiedai taikomi šviesos bangų ilgiui matuoti. Žinodami lęšio kreivumo spindulį R ir tiksliai išmatavę k-tojo žiedo spindulį r_k, galime apskaičiuoti į lęšį krintančios šviesos bangos ilgį. Antra vertus, žinodami krintančios šviesos bangos ilgį, galime rasti lęšio kreivumo spindulio ilgį. Taisyklingus Niutono žiedus lengvai iškraipo net menkiausi lęšio ir plokštelės paviršiaus nelygumai (8.10.6 pav.). Todėl pagal žiedų formą galima labai tiksliai kontroliuoti rutuliškųjų veidrodžių ir plokštelių paviršių šlifavimo kokybę arba nustatyti atsiradusius kitus paviršiaus defektus.



8.10.6 pav.

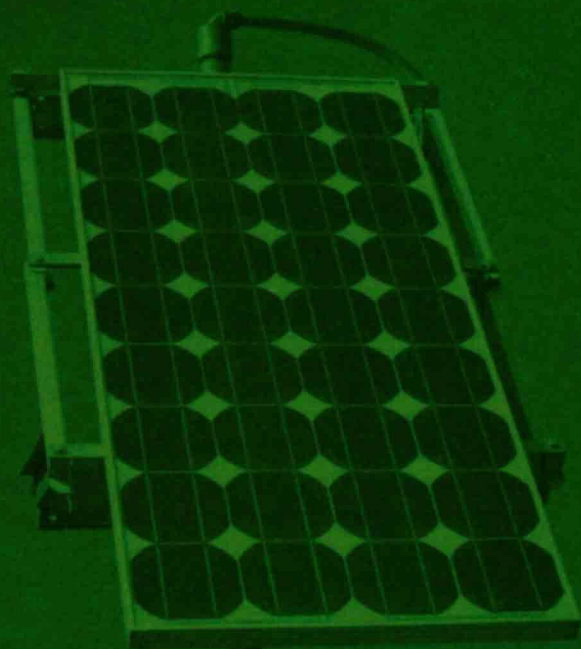
Šviesos interferencija taikoma ir kitose srityse. Ja pagrįstas labai tikslių matavimo prietaisų – interferomètrų – veikimas. Interferometrai naudojami, kai reikia labai tiksliai išmatuoti mažus ilgius: šviesos bangų ilgį, plonųjų plėvelių storį; nustatyti įvairių terpių lūžio rodiklį (ir jo pokyčius); kontroliuoti veidrodžių, lęšių ir kitų paviršių šlifavimo kokybę.

Interferencija plonosiose plėvelėse taikoma optinėms sistemoms skaidrinti. Į optinę sistemą, pavyzdžiui, objektyvą, krintanti šviesa atsispindi nuo tą sistemą sudarančių lęšių paviršių. Dėl daugkartinio atspindžio sistema praranda daug šviesos. Kad kuo mažiau jos atsispindėtų, optinių sistemų priekiniai paviršiai padengiami skaidriomis plonomis plėvelėmis, kurių absoliutusis lūžio rodiklis n_p mažesnis už lęšių ar kitų optinių prietaisų absoliutųjį lūžio rodiklį n_s. Plėvelės storis turi būti toks, kad atsispindėjusios bangos viena kitą slopintų (būtų interferencijos minimumas).

Skyriaus „Banginė optika" apibendrinimas

Šviesos greičio matavimo būdai	Šviesos greitį galima išmatuoti šiais būdais: • astronominiais, • laboratoriniais.
Šviesos greitis	Bet kokio dažnio elektromagnetinių bangų greitis vakuume yra vienodas ir lygus $c = (299\,792{,}456 \pm 0{,}001)$ km/s. Sprendžiant praktinius uždavinius, imama suapvalinta šviesos sklidimo greičio vakuume skaitinė vertė $c \approx 300\,000$ km/s.
Elektromagnetinė banga	Elektromagnetinio lauko plitimas erdvėje laikui bėgant vadinamas elektromagnetine banga.
Elektromagnetinės bangos (šviesos bangos) ilgis	Šviesos bangą apibūdina šie parametrai: bangos ilgis λ, sklidimo greitis terpėje v (vakuume c), virpesių dažnis ν ir virpesių periodas T. $\lambda = vT$, arba $\lambda = \frac{v}{\nu}$.
Elektromagnetinės bangos (šviesos) greitis terpėje	Elektromagnetinės bangos (šviesos) greitis v terpėje priklauso nuo jos santykinės dielektrinės skvarbos ε ir santykinės magnetinės skvarbos μ: $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$; čia c – šviesos greitis vakuume.
Šviesos dispersija Terpės lūžio rodiklio n pri-	klausomybė nuo šia terpe sklindančios šviesos bangos dažnio (arba ilgio) vadinama šviesos skaida, arba šviesos dispersija. Šviesos dispersijos reiškinys dažnai apibrėžiamas ir taip: šviesos dispersija yra baltos šviesos skaidymas į spektrą.
Šviesos interferencija	Šviesos interferencija vadinamas toks reiškinys, kai, susidedant dviem ar daugiau koherentinių šviesos bangų, vienose erdvės srityse atstojamasis šviesos intensyvumas sustiprėja, o kitose – susilpnėja. Susidedančių šviesos bangų atstojamasis intensyvumas nelygus atskirų bangų intensyvumų sumai.
Koherentiniai šviesos šaltiniai	Šaltiniai, skleidžiantys vienodo dažnio ir vienoje plokštumoje poliarizuotas šviesos bangas, kurių fazių skirtumas pastovus, vadinami koherentiniais.

Šviesos interferencijos maksimumo sąlyga	$\Delta d = k\lambda$; čia k – interferencijos maksimumo eilė (k = 0, ±1, ±2,...), λ – šviesos bangos ilgis.
Šviesos interferencijos minimumo sąlyga	$\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$; čia k = 0, ±1, ±2, ..., λ – šviesos bangos ilgis.
Šviesos bangos optinis kelias	Fizikinis dydis, lygus geometrinio kelio d, kurį šviesos banga nueina kokia nors terpe, ir tos terpės absoliučiojo lūžio rodiklio n sandaugai, vadinamas bangos optiniu keliu.
Šviesos difrakcija	Šviesos bangos nukrypimas nuo jos tiesiaeigio sklidimo vadinamas šviesos difrakcija. Lygiagrečiųjų šviesos spindulių difrakcija vadinama Fraunhoferio difrakcija.
Optinių prietaisų skiriamoji geba	Optinių prietaisų skiriamąją gebą galima apibrėžti kaip tuos prietaisus sudarančių sistemų gebėjimą išskirti atskirus objektus ar jų dalis.
Reilio skiriamosios gebos kriterijus	Du taškinius spinduolius (objektus) galima išskirti, jeigu vieno jų difrakcinio vaizdo centrinis maksimumas yra kito spinduolio difrakcinio vaizdo pirmajame minimume.
Difrakcinės gardelės periodas	Skaidraus plyšio pločio a ir rėžio pločio b suma $a + b = d$ vadinama difrakcinės gardelės periodu.
Natūralioji, arba nepoliarizuotoji, šviesa	Šviesa vadinama natūraliąja, arba nepoliarizuotąja, jeigu jos bangas sudarantys elektrinio lauko stiprio $\vec{E}$ ir magnetinės indukcijos $\vec{B}$ vektoriai virpa įvairiomis kryptimis, statmenomis šviesos bangų pluošto sklidimo krypčiai.
Poliarizuotoji šviesa	Šviesos banga, kurios elektrinio lauko stiprio vektorius $\vec{E}$ (taip pat ir magnetinės indukcijos vektorius $\vec{B}$) virpa vienintele kryptimi (vienoje plokštumoje), vadinama tiesiškai poliarizuota.



O p t i k a





9 Kvantinė optika

Šiame skyriuje susipažinsite su dalelinėmis šviesos savybėmis, kurios išryškėja, kai ji sąveikauja su terpės, kuria sklinda, medžiaga. Nagrinėsite kūnų spinduliavimą ir sugertį, sužinosite apie šviesos kvantus (fotonus), suprasite, kaip jie gali išplėšti iš atomo elektronus.

9.1. Šiluminė spinduliuotė

Pagrindinės sąvokos

Šilumìnė spinduliuõtė,
pusiáusviroji šilumìnė spinduliuõtė,
juodàsis spinduõlis,
júodojo kū́no mòdelis.

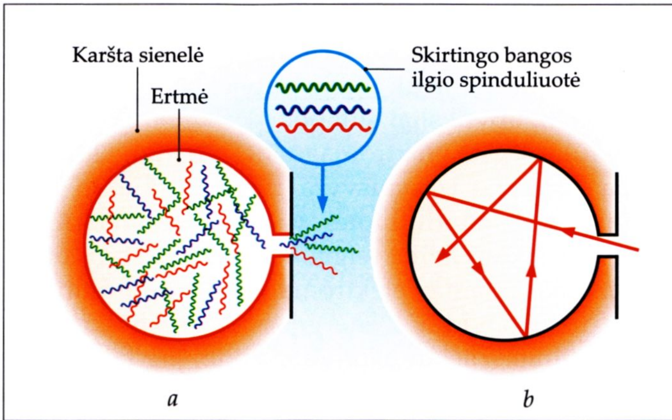
Šiluminė spinduliuotė

Žinome, kad smarkiai įkaitinti kūnai pradeda švytėti (skleisti elektromagnetines bangas). Pavyzdžiui, įkaitę kietieji kūnai ir skysčiai spinduliuoja baltą šviesą, kurios spektras yra ištisinis. (Apie spektrus ir jų rūšis šiame skyriuje dar kalbėsime.) Kūnų temperatūrai mažėjant, jų skleidžiama spinduliuotė darosi ne tokia intensyvi, kartu keičiasi ir spektrinė jos sudėtis. Atvėsę dar labiau, kūnai nustoja skleisti regimąją šviesą ir spinduliuoja tik akiai nematomus infraraudonuosius spindulius. Ši elektromagnetinė kūnų spinduliuotė vadinama ***šilumìnė***. Ją sukelia sužadinti kūnų atomai arba molekulės dėl jų šiluminio judėjimo, kuris priklauso nuo temperatūros.

Kūnai ne tik skleidžia, bet ir sugeria šiluminę spinduliuotę. Jeigu spinduliuojančio kūno temperatūra nekinta, vadinasi, jis savo energiją nuolat papildo. Pastovios temperatūros kūno skleidžiama spinduliuotė vadinama pusiausvirąja. Taip spinduliuoti gali tik termiškai izoliuotos sistemos kūnai, kurie energiją perduoda vieni kitiems per elektromagnetinę spinduliuotę ir sugertį. ***Termiškai izoliuotos kūnų sistemos šiluminė spinduliuotė vadinama pusiáusvirąja šilumìnė spinduliuotè.***

Juodasis spinduolis

Įkaitusių realiųjų kūnų elektromagnetinė spinduliuotė įvairios temperatūros sąlygomis ne visada sutampa. Norint išvengti šio skirtumo, tyrimams naudojamas ***júodojo kū́no mòdelis***, kitaip vadinamas ***juodúoju spinduoliù*** (9.1.1 pav., *a*). Antra vertus, juodasis spinduolis yra idealus spinduliuotės imtuvas, sugeriantis visą į jį kritusią bet kokio ilgio bangų energiją (9.1.1 pav., *b*). Taigi jo sugertiẽs gebà lygi 1. Kūnų, kurių savybės būtų tokios pat kaip juodojo spinduolio, gamtoje nėra. Artimiausiu jam galima vadinti suodžiais padengtą kūną (jo sugerties geba artima 1).



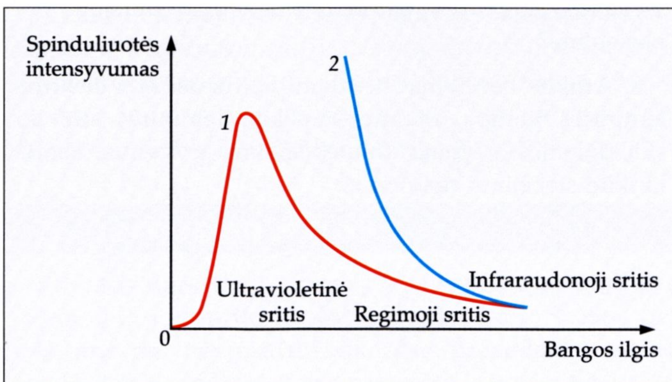
9.1.1 pav.

Juodasis spinduolis pavaizduotas 9.1.1 paveiksle, *b*. Tai tuščiavidurio uždaro kūno, kurio neskaidrioje šviesą difuziškai atspindinčioje sienelėje padaryta maža skylutė, vidinė ertmė. Patekęs į ją, spindulys daugybę kartų atsispindi nuo vidinių kūno sienelių ir yra visas jų sugeriamas.

Juodojo spinduolio skleidžiama spinduliuotė

Dėsniai, apibūdinantys tolydžiąją įkaitintų kūnų spinduliuotę, buvo nustatyti XIX a. pabaigoje. Juodojo spinduolio spektras taip pat yra ištisinis, taigi jo skleidžiamą spinduliuotę sudaro visų ilgių bangos. Tačiau, aiškinant, kaip šių kūnų spinduliuotės energija pasiskirsto spektre, atsirado tam tikra prieštara. Spinduliuotės intensyvumo teorinis spektrinis skirstinys, apskaičiuotas pagal klasikinės fizikos dėsnius, neatitiko bandymais gauto skirstinio. Abu šie skirstiniai

9.1.2 pav.



pavaizduoti 9.1.2 paveiksle. *1* kreivė gauta bandymais, *2* kreivė – teoriškai. Trumpųjų bangų srityje jos skyrėsi labiausiai ir tik ilgųjų srityje, be to, kai kūnai labai karšti, apytiksliai sutapo.

Pagal klasikinę elektromagnetinių bangų sklidimo teoriją šiluminė pusiausvyra tarp spinduolio ir jo skleidžiamos spinduliuotės yra neįmanoma. Antra vertus, klasikinė fizika teigia, kad įkaitęs spinduolis, tolygiai skleisdamas elektromagnetinę spinduliuotę, turėtų netekti vidinės energijos ir atvėsti iki absoliučiojo nulio. Tačiau bandymai rodo, jog taip iš tikrųjų nėra. Įkaitę kūnai niekada neišspinduliuoja visos savo energijos. Paaiškėjo, kad, sėkmingai paaiškinusi šviesos interferencijos ir difrakcijos reiškinius, kuriems šviesos bangų sąveika su medžiaga neturi esminio poveikio, klasikinė fizika nesugeba pagrįsti kūnų šiluminio spinduliavimo dėsningumų. Šiuo atveju minėta sąveika yra labai svarbi.

Klausimai ir užduotys ??

1. Ką vadiname šilumine spinduliuote?

2. Kas yra pusiausviroji šiluminė spinduliuotė?

3. Apibūdinkite juodąjį spinduolį.

4. Išvardykite jums žinomus šiluminės spinduliuotės šaltinius.

5. Juodasis spinduolis sugeria visą į jį krintančių bangų energiją. Kodėl jis matomas?

6. Kodėl visų optinių prietaisų vidinės sienelės dažomos juodai?

7. Dėl saulės spinduliuotės sugerties Žemės masė kiekvieną sekundę turėtų padidėti. Kodėl tokio didėjimo nepastebime?

8. Atlikite bandymą: keisdami kaitinamosios elektros lemputės įtampą, ekrane stebėkite lemputės siūlelio skleidžiamosios spinduliuotės spektro pokyčius. Paaiškinkite stebėjimo rezultatus.

9.2. Spektrų rūšys

Spinduliuotės spektro samprata

Nerasime nė vieno šaltinio, kuris spinduliuotų vienos spalvos ir tiksliai apibrėžto dažnio šviesą. Tuo jau įsitikinome, 8 skyriuje nagrinėdami šviesos dispersiją. Spinduliuotės energija yra tam tikru būdu pasiskirsčiusi pagal jos bangos ilgį arba dažnį (nes bangos ilgį ir dažnį sieja ryšys $\lambda\nu = c$). ***Kūno (spinduolio) skleidžiamos spinduliuotės spektrinių linijų visuma vadinama spinduliũtės spektrù.***

Pagrindinės sąvokos

Spinduliũtės spèktras,
linijìnis, júostinis ir ištisìnis spinduliũtės spèktras,
sugertiẽs spèktras,
spèktrinė anãlizė.

Spinduliuotės spektrai

Skirtingų medžiagų skleidžiamos spinduliuotės spektrinė sudėtis yra labai įvairi, tačiau visus spektrus galima suskirstyti į tokias rūšis: ištisinius, juostinius ir linijinius spektrus. Jie pavaizduoti 9.2.1 paveiksle: *a* – ištisinis, *b* – juostinis, *c* ir *d* – linijiniai.

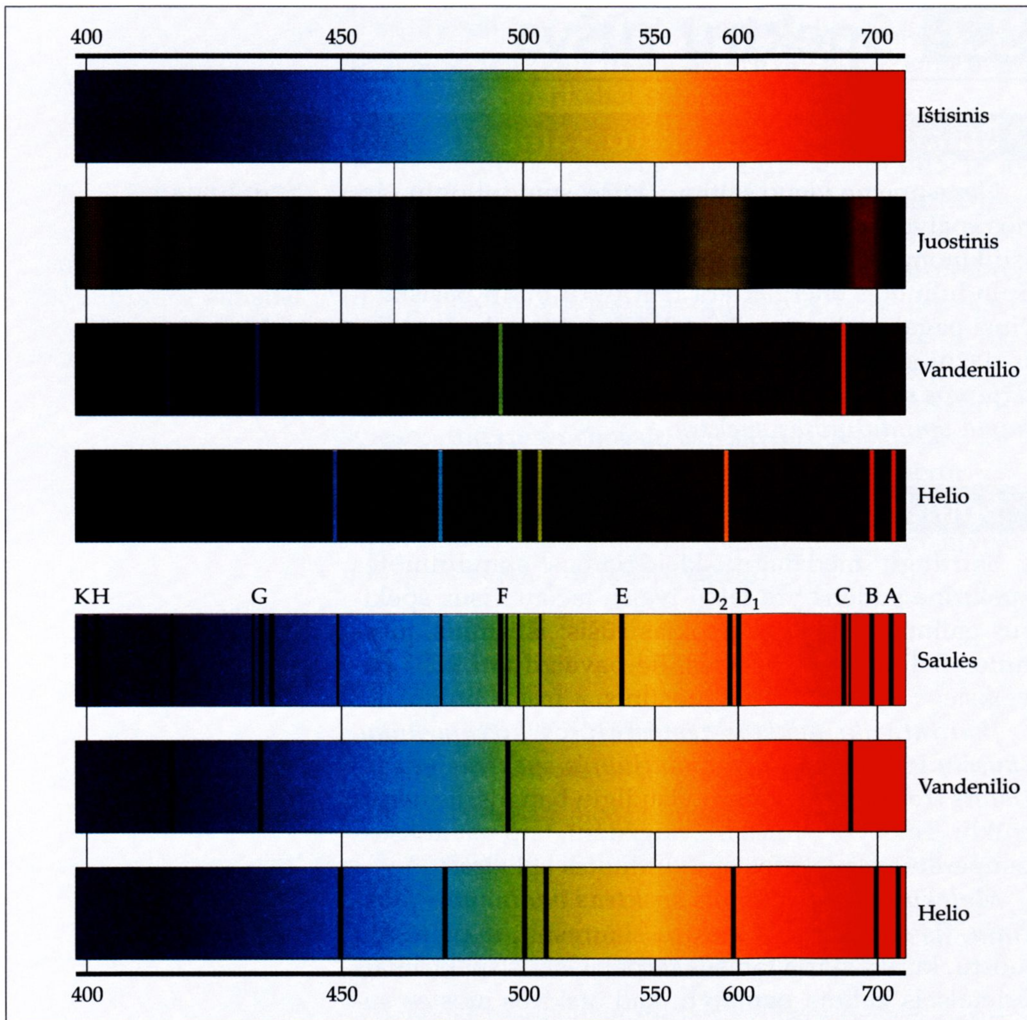
Įkaitintų iki aukštos temperatūros kietųjų kūnų, skysčių ir tankių dujų spinduliuotės spektras yra ištisìnis (tolydùs). Jį sudaro visų ilgių bangos, jis neturi trūkių. Toks yra Saulės ir žvaigždžių, taip pat aukštos temperatūros plazmos spinduliuotės spektras.

Molekulių skleidžiamas spektras vadinamas júostiniu. Jis sudarytas iš atskirų siauresnių ir platesnių juostų, kurias skiria tamsūs tarpai. Gerais spektriniais prietaisais galima pamatyti, kad atskiros juostos susideda iš daugybės arti viena kitos išsidėsčiusių spektrinių linijų. Jų atsiradimą lemia procesai, vykstantys atomuose, iš kurių sudarytos molekulės.

Aukštos temperatūros tarpusavyje nesąveikaujančių dujų atomų spinduliuotės spektras yra linijìnis. Jį sudaro įvairių spalvų linijos, kurias skiria plačios tamsios juostos. Iš spektro matyti, kad atomai spinduliuoja tiksliai apibrėžto dažnio bangas.

Sugerties spektrai

Šviesos sugertis yra priešingas spinduliavimui procesas. Jeigu spinduolio skleidžiamą baltą šviesą praleistume per nespinduliuojančias (nesužadintas) dujas, ištisinio spektro fone atsirastų tamsių linijų. Jos



9.2.1 pav.

yra ***spinduliuõtės sugertiẽs lìnijos ir vadinamos sugertiẽs spektrù***. 9.2.1 paveiksle, *e*, *f* ir *g*, matome Saulės, vandenilio ir helio sugerties spektrus.

Spektrinė analizė

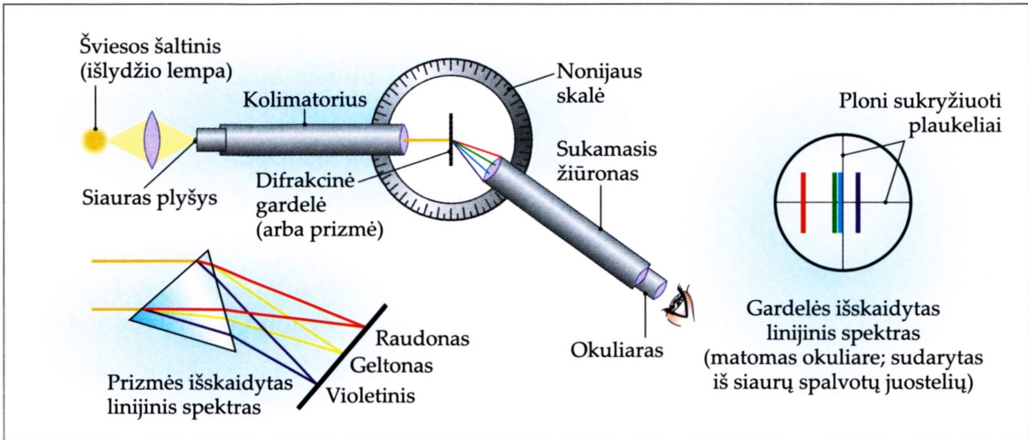
Spèktrinė anãlizė – tai medžiagos kokybinės ir kiekybinės sudėties nustatymas pagal jos spektrą. Kiekvieno elemento skleidžiamos spinduliuotės spektras yra būdingas tik jam vienam (9.2.1 pav.). Todėl, tiriant medžiagos linijinį spinduliuotės spektrą, galima sužinoti, iš kurių cheminių elementų sudaryta medžiaga ir kiek joje yra kiekvieno elemento. Analizei

naudojami specialūs cheminių elementų spektrų atlasai. Cheminio elemento kiekis nustatomas lyginant tiriamos medžiagos atskirų spektro linijų intensyvumą su žinomo kiekio cheminio elemento linijų intensyvumu. Iš kokių cheminių elementų sudarytas bandinys (kokybinė analizė), nustatoma pagal linijų išsidėstymą. Spektre gali atsirasti linijų, neatitinkančių nė vieno žinomo cheminio elemanto. Tada būtų galima teigti, kad bandinyje dar yra ir nežinomo cheminio elemento. Nagrinėjant Saulės skleidžiamos spinduliuotės spektrą, buvo atrastas iki tol nežinomas naujas elementas – helis.

Tiksliems spektrų tyrimams reikia prietaisų, duodančių aiškų tiriamos medžiagos skleidžiamos spinduliuotės spektrą. Be to, labai svarbu, kad gerai išsiskirtų skirtingi spinduliuotės bangų dažniai, t. y. kad atskiros spektro dalys nedengtų viena kitos. Tokie prietaisai vadinami spektriniais. Jie skirstomi į spektroskopùs (lot. *spectrum* – vaizdinys, vaizdas, gr. *skopeō* – žiūriu, stebiu) ir spektografùs (lot. *spectrum* – vaizdinys, vaizdas, gr. *graphō* – rašau). Pagrindinė spektrinių prietaisų dalis yra prizmė arba difrakcinė gardelė. Šiuolaikiniai spektrinės analizės metodai ir spektriniai prietaisai yra labai tikslūs, jie leidžia aptikti ir atpažinti net labai mažus elementų kiekius medžiagoje (iki 10^{-6} mg).

Spektroskopą (9.2.2 pav.) sudaro du vamzdžiai: kolimãtorius bei sukamasis žiūronas, ir uždengta stiklinė (kvarcinė) prizmė arba difrakcinė gardelė. Visa tai įtaisyta ant apskrito staliuko, turinčio nonijaus skalę.

9.2.2 pav.



Viename kolimatoriaus gale yra siauras plyšys medžiagos skleidžiamos spinduliuotės pluoštui išskirti. Kolimatoriaus lęšių sistema tą pluoštą paverčia lygiagrečiuoju ir nukreipia į prizmės sienelę. Ši jį išskaido į linijinį spektrą (mat prizmės lūžio rodiklis priklauso nuo šviesos bangos ilgio).

Vietoj prizmės įstačius difrakcinę gardelę, toks pat spektras gaunamas dėl šviesos bangų difrakcijos. Išskaidyti lygiagretieji pluoštai toliau patenka į sukamąjį žiūroną. Čia juos lęšis surenka savo židinio plokštumoje. Toje plokštumoje yra matinis ekranas. Jame sukuriami spalvoti plyšio atvaizdai, kurie sudaro tiriamos medžiagos spinduliuotės spektrą. Šį spektrą galima stebėti pro žiūrono okuliarą. Matinį ekraną pakeitę fotoplokštele, gautą spektrą galime fotografuoti. Tada aprašytą prietaisą vadinsime spektrografu. Vietoj prizmės naudodami kristalines gardeles, gauname prietaisą, vadinamą difrãkciniu spektroskopù arba difrãkciniu spektrografù.

Šiuolaikiniai spektriniai prietaisai leidžia atlikti tyrimus ir medžiagos spinduliuotės nematomose spektro srityse (infraraudonojoje ir ultravioletinėje srityje).

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname spinduliuotės spektru?

2. Išvardykite spinduliuotės spektrų rūšis ir jas apibūdinkite. Paaiškinkite, kas yra sugerties spektras.

3. Kodėl Saulės spektre yra gerokai daugiau spalvų negu kurio nors kito cheminio elemento, pavyzdžiui, natrio, spektre?

4. Kurios rūšies yra kaitinamosios lemputės siūlelio spinduliuotės spektras?

5. Ką vadiname spektrine analize?

6. Paaiškinkite, kaip, taikant spektrinės analizės tyrimo metodus, galima sužinoti cheminę medžiagos sudėtį.

7. Paaiškinkite, kodėl iš Mėnulio atspindėtos šviesos spektro galima spręsti apie Mėnulio paviršiaus sudėtį.

8. Kodėl draudžiamiesiems kelio ženklams parinkta raudona spalva?

9.3. Planko kvantų hipotezė

Šviesos kvantai

Prieštarą, kuri atsirado tarp bandymo ir teorijos aiškinant juodojo spinduolio skleidžiamos spinduliuotės intensyvumo spektrinį skirstinį, 1900 m. išsprendė vokiečių fizikas Maksas Plankas. Iš naujo peržiūrėjęs klasikinės fizikos pagrindus, ankstesniuose samprotavimuose jis aptiko klaidą. Iki tol buvo manoma, kad atomai gali spinduliuoti bet kokio dažnio bangas. Plankas iškėlė tokią hipotèzę: ***elektromagnetinę spinduliuotę atomai skleidžia arba sugeria ne tolygiai, o atskiromis energijos porcijomis.*** Tas porcijas jis pavadino ***šviesõs kvántais*** (lot. *quantum* – kiek), arba ***fotònais*** (gr. *phōs* – šviesa). Kiekvieno šviesos kvanto energija E yra tiesiogiai proporcinga skleidžiamos arba sugeriamos spinduliuotės dažniui ν:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}; \qquad (9.1)$$

čia $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J · s – ***universalióji konstánta***, vėliau pavadinta ***Plánko konstánta***. Iš 9.1 formulės matyti, kad šviesos kvantų energija yra nepaprastai mažas dydis. Kadangi spinduliuojančių atomų energija kinta šuoliais, tai jie gali skleisti arba sugerti kartotinį energijos kiekį:

$$h\nu,\ 2h\nu,\ 3h\nu,\ ...,\ nh\nu,$$

t. y. tik sveikąjį skaičių kvantų. Taip pamažu buvo prieita prie išvados, kad klasikinės fizikos dėsniai mikropasaulio reiškiniams, tarp jų ir šiluminės spinduliuotės dėsningumams, apibūdinti netinka.

Planko kvantų hipotezė toliau buvo plėtojama tiriant fotoelektrinį reiškinį, cheminį šviesos veikimą, šviesos slėgį ir kt. Ji padėjo atsirasti naujai fizikos mokslo sričiai – ***kvántinei fìzikai***, tačiau praėjo nemažai laiko, kol ši hipotezė fizikų buvo pripažinta. 1918 m. už energijos kvanto atradimą ir juodojo spinduolio skleidžiamos spinduliuotės energijos spektrinio skirstinio paaiškinimą Maksui Plankui buvo paskirta Nobelio premija.

Pagrindinės sąvokos

Šviesõs kvántas,
fotònas,
Plánko konstánta,
klasikìnė fìzika,
kvántinė fìzika.

Planko pasiūlytą hipotezę po kelerių metų atgaivino ir išplėtojo Albertas Einšteinas. Ją papildęs ir apibendrinęs, Einšteinas padarė tokią išvadą: spinduolis skleidžia elektromagnetinę spinduliuotę; erdvėje ji sklinda ir medžiagos yra sugeriama mažomis diskrečiomis (lot. *diskretus* – atskirtas) energijos porcijomis. Vadinasi, kiekviena elektromagnetinės spinduliuotės porcija neša energiją, kuri vadinama energijos kvantu.

Einšteinas suprato, kad medžiagos skleidžiama elektromagnetinė spinduliuotė turi tenkinti Planko formulę (9.1). Taigi ji yra ne tolydi, kaip manyta anksčiau, bet sudaryta iš mažų energijos porcijų (kvantų), turi tam tikrą dažnį ir sklinda šviesos greičiu c. Visų fotonų, sudarančių vienspalvį dažnio ν šviesos bangų srautą, energija vienoda ir lygi $h\nu$. Suprantama, kad netolydi yra ir šviesos sugertis. Šviesos srauto fotonai, kaip ir dalelės, visą savo energiją perduoda ne apskritai medžiagai ir net ne atomui, o tik atskiriems elektronams.

Fotono masė ir judesio kiekis

Viena svarbiausių fotono charakteristikų yra nuo spinduliuotės dažnio priklausanti jo energija $E = h\nu$. Be jos, fotonas, kaip ir dalelė, turi masę ir judesio kiekį. Fotono masę galime sužinoti remdamiesi Einšteino masės ir energijos sąryšiu $E = mc^2$ ir Planko formule (9.1). Iš jų gauname:

$$m_f = \frac{h\nu}{c^2}. \tag{9.2}$$

Fotono masė iš esmės skiriasi nuo kitų dalelių masės – fotonas neturi rimties masės ($m_0 = 0$). Nejudėdamas jis neegzistuoja, o atsiradęs iš karto įgyja greitį c. Žinodami fotono masę m_f ir sklidimo greitį c, galime rasti jo judesio kiekį:

$$p = m_f c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \tag{9.3}$$

Iš čia matyti: kuo didesnis fotono dažnis, tuo didesnė jo energija bei judesio kiekis ir tuo ryškesnės dalelinės šviesos savybės.

Fotonų idėja Albertui Einšteinui padėjo paaiškinti fotoefektą, kurį XX a. pradžioje atrado Heinrichas Hercas. Šį reiškinį nagrinėsime kitoje temoje.

Klausimai ir užduotys

1. Paaiškinkite Planko hipotezės esmę.

2. Išreikškite formulėmis fotono masę, greitį, energiją ir judesio kiekį.

3. Fotono bangos ilgis lygus $1{,}6 \cdot 10^{-12}$ m. Apskaičiuokite šio fotono energiją. ($1{,}2 \cdot 10^{-13}$ J)

4. Kokiai rūšiai priskiriama spinduliuotė, kurios fotono energija lygi:
a) $2 \cdot 10^{-17}$ J; b) $4 \cdot 10^{-19}$ J; c) $3 \cdot 10^{-23}$ J?

Mokomės spręsti uždavinius

Kiek fotonų per 1 s turi patekti į akies tinklainę, kad akis justų šviesą, kurios bangos ilgis 0,5 μm? Ribinė šviesos srauto galia yra $2 \cdot 10^{-17}$ W.

n – ?	$t = 1$ s $\lambda = 0{,}5\ \mu\text{m} = 5 \cdot 10^{-7}$ m $N = 2 \cdot 10^{-17}$ W

Sprendimas

Į akį patenkančios šviesos visa energija lygi $W = Nt$, o vieno fotono energija $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$. Tada per 1 s į akies tinklainę patenkančių fotonų skaičių randame taip:

$$n = \frac{W}{E} = \frac{Nt\lambda}{hc}.$$

Įrašę dydžių vertes, gauname:

$$n = \frac{2 \cdot 10^{-17}\ \text{W} \cdot 1\ \text{s} \cdot 5 \cdot 10^{-7}\ \text{m}}{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}} = 50.$$

Atsakymas: $n = 50$.

Užduotys savarankiškam darbui

1. 100 W galios šviesos spinduolis kas 1 s išspinduliuoja $5 \cdot 10^{20}$ fotonų. Apskaičiuokite spinduliuotės vidutinį bangos ilgį. (0,99 μm)

2. Kiek kartų raudonosios spinduliuotės (0,76 μm) kvanto energija mažesnė negu violetinės (0,4 μm)?

3. Apskaičiuokite, kiek regimosios šviesos fotonų per 1 s išspinduliuoja 60 W galios elektros lemputė. 2 % jos skleidžiamos energijos tenka regimajai šviesai (kurios bangos ilgis 0,55 μm), kita dalis virsta šiluma. $(\approx 3 \cdot 10^{18})$

4. Apskaičiuokite, kiek energijos turi fotonas, kurio bangos ilgis lygus:

a) 0,2 μm; $(10^{-18}$ J)
b) 2 mm; $(10^{-19}$ J)
c) 0,01 m. $(2 \cdot 10^{-23}$ J)

5. Šviesos, kurios bangos ilgis 0,6 μm, srauto energija $E = 7 \cdot 10^{-6}$ J. Kiek fotonų yra šiame sraute? $(2 \cdot 10^{13})$

6. Kiek fotonų turi patekti į akies tinklainę per 1 s, kad akis justų šviesą, kurios bangos ilgis 550 nm? Ribinė šviesos srauto galia $2 \cdot 10^{-17}$ W. (55)

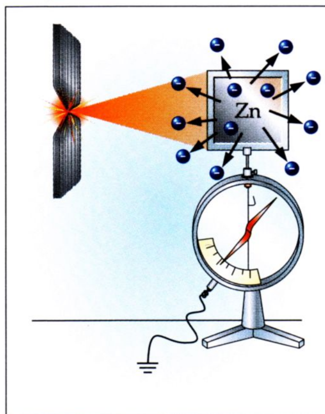
7. Apskaičiuokite fotono judesio kiekį, kai šviesos bangos ilgis lygus 0,5 μm. $(1{,}33 \cdot 10^{-27}$ kg · m/s)

9.4. Fotoefektas

Pagrindinės sąvokos

Išorìnis fotoefèktas, fotoelektrònas, fotosrovė̃.

9.4.1 pav.



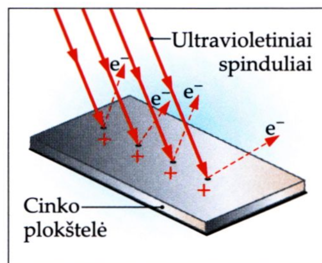
Fotoefektas

Vokiečių fizikas Heinrichas Hercas, atradęs elektromagnetines bangas, 1887 m. pirmasis pastebėjo ir fotoefèktą (gr. *phōs* – šviesa, lot. *effectus* – veikimas). Šis reiškinys (kitaip dar vadinamas fotoelektriniu reiškiniu) padėjo atskleisti šviesos prigimtį, kartu buvo svarbus ir tolesnei mokslo apie šviesą raidai, ieškant atsakymo į klausimą, kas iš tikrųjų yra šviesa.

Su fotoefektu jau šiek tiek susipažinote X klasėje. Dabar tas žinias praplėsime.

Išorìnį fotoefèktą galima pademonstruoti įrenginiu, pavaizduotu 9.4.1 paveiksle. Gryno cinko plokštelę sujungiame su elektrometro virbu ir jiems abiem suteikiame neigiamąjį krūvį. Apšvietę plokštelę ultravioletine spinduliuote, pastebime, kad elektrometras išsielektrina. Jeigu prieš apšviesdami plokštelę įelektriname teigiamai, elektrometras neišsielektrina. Elektriškai neutrali plokštelė, apšviesta ultravioletine spinduliuote, įgyja teigiamąjį krūvį (9.4.2 pav.).

Šie bandymai rodo, kad ultravioletinė spinduliuotė, veikdama cinko (arba kito metalo) plokštelės paviršių, išmuša iš jo neigiamąsias elektringąsias daleles. Išmatavus jų krūvį ir masę, paaiškėjo, kad tos dalelės yra elektronai. ***Elektronų išplėšimas iš medžiagos, kurią veikia elektromagnetinė (šviesos) spinduliuotė, vadinamas išoriniù fotoefektù, o išplėšti elektronai – fotoelektrònais.***

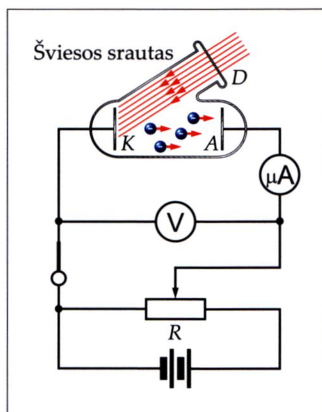


9.4.2 pav.

Kokybinis išorinio fotoefekto aiškinimas, kad šviesa išplėšia iš metalinės plokštelės paviršiaus elektroną, to meto fizikams nebuvo visiškai netikėtas. Į plokštelės paviršių krintančios elektromagnetinės bangos perduoda metalo elektronams energiją. Šie, gavę jos pakankamai, gali išlėkti iš metalinės plokštelės. Toks aiškinimas visiškai atitiko klasikinę elektromagnetinių bangų teoriją. Tačiau vėlesni fotoefekto tyrimai parodė, kad kai kurių bandymais gautų šio reiškinio faktų klasikinė teorija paaiškinti negali.

Fotoefekto eksperimentiniai rezultatai

Kiekybinių duomenų apie fotoefektą gauta naudojant įrenginį, pavaizduotą 9.4.3 paveiksle. Jį sudaro vakuuminis stiklinis balionas, turintis du elektrodus: anodą *A* ir fotokatodą *K*. Prie jų prijungtas nuolatinės įtampos šaltinis. Įtampą tarp elektrodų galima keisti potenciometru *R* (taip vadinamas į grandinę tam tikru būdu įjungtas reostatas). Į tą pačią grandinę įjungtu jautriu mikroampermetru matuojamas srovės stipris, o voltmetru – įtampa tarp elektrodų *A* ir *K*. Ultravioletiniai spinduliai pro kvarco stiklo langelį *D*, įtaisytą balione, nukreipiami į fotokatodą *K*, padengtą tiriamu metalu. Iš apšviesto elektrodo išlėkę fotoelektronai, veikiami elektrinio lauko, juda teigiamojo elektrodo *A* link ir taip sukuria elektros srovę. Ji vadinama ***fotosrovė.***



9.4.3 pav.

Tuo pačiu įrenginiu buvo ištirta, kaip fotosrovės stipris priklauso nuo ultravioletinės spinduliuotės dažnio ir intensyvumo, taip pat nuo įtampos tarp elektrodų *A* ir *K*. Be to, išsiaiškinta, kokią įtaką fotoefektui turi metalas, kuriuo padengtas elektrodas *K*. Nustatyta, kad kai kurios medžiagos, pavyzdžiui, litis, natris ir kalis, spinduliuoja fotoelektronus, kai yra apšviečiamos mėlyna šviesa.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname išoriniu fotoefektu?
2. Ką vadiname fotoelektronais?
3. Paaiškinkite fotosrovės fizikinę prasmę.
4. Kokie faktai rodo, kad šviesa turi dalelių savybių?

9.5. Fotoefekto dėsniai

Pagrindinės sąvokos

Sóties fotosrovẽ,
stãbdymo į́tampa,
fotoefèkto raudonóji ribà,
elektròno išláisvinimo dárbas.

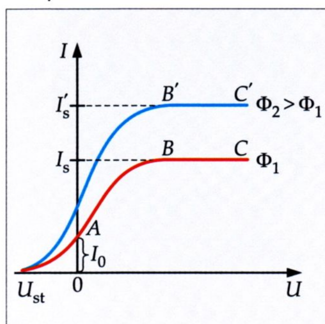
Išorinio fotoefekto voltamperinė charakteristika

9.4 temoje aprašytu įrenginiu buvo tiriama, kaip fotosrovės stipris I priklauso nuo įtampos U tarp stiklinio baliono elektrodų. Gautos dvi kreivės, atitinkančios skirtingą fotokatodo apšvietą (9.5.1 pav.). Jos vadinamos ***išorìnio fotoefèkto voltampèrinėmis charakterìstikomis***.

Į fotokatodą krintančios elektromagnetinės spinduliuotės dažnis abiem atvejais buvo vienodas. Apšviestas elektrodas spinduliavo fotoelektronus. Kol tarp elektrodų nebuvo elektrinio lauko, elektronai kaupėsi prie katodo. Anodą A sujungus su teigiamuoju įtampos šaltinio poliumi, elektrine grandine pradėjo tekėti fotosrovė. Nekeičiant apšvietos, buvo didinamas stikliniame balione įtaisytų elektrodų potencialų skirtumas. Fotosrovė iš pradžių pamažu stiprėjo (kreivės dalis AB), nes vis daugiau fotoelektronų, išplėštų per vienetinį laiką iš katodo, sugebėdavo pasiekti anodą. Tačiau paskui fotosrovės stipris pasiekė didžiausią vertę (kreivės dalis BC) ir toliau nebedidėjo. Vadinasi, visi iš metalinės plokštelės per vienetinį laiką šviesos išplėšti fotoelektronai pasiekė anodą. Didžiausio stiprio fotosrovė I_s vadinama ***sóties fotosrovè***.

Soties fotosrovę galima sustiprinti (kreivės dalis $B'C'$), tik padidinant fotokatodo apšvietą (nekeičiant krintančios į jį spinduliuotės dažnio). Vadinasi, išplėštų fotoelektronų skaičius priklauso nuo krintančios spinduliuotės intensyvumo ($\Phi_2 > \Phi_1$; čia Φ – į fotokatodą krintančios šviesos srautas).

9.5.1 pav.



Iš grafikų matyti, kad fotosrovė I_0 teka net ir tada, kai potencialų skirtumas tarp elektrodų lygus nuliui ($U = 0$). Tai rodo, kad fotoelektronai, elektromagnetinės spinduliuotės išplėšti iš fotokatodo paviršiaus, turi pradinės kinetinės energijos. Sukeitus įtampos šaltinio polius (anodą A prijungus prie neigiamojo poliaus), elektrinis laukas ima stabdyti fotoelektronus ir vis mažiau jų pasiekia anodą. Esant tam tikrai įtampai U_{st}, kuri vadinama ***stãbdymo į́tampa***, fotosrovė nustoja tekėti – sustabdyti fotoelektronai grįžta į katodą. Vadinasi, net daugiausia kinetinės energijos E_k turintys (greičiausi) fotoelektronai ją praranda. Kinetinė energija naudojama darbui atlikti prieš stabdančias elektrinio lauko jėgas. Tada turi galioti lygybė

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = eU_{st}; \qquad (9.4)$$

čia e ir m – elektrono krūvis ir masė, v_{max} – fotoelektronų pradinis greitis, U_{st} – stabdymo įtampa. Iš 9.4 lygybės galime sužinoti pradinį fotoelektronų greitį:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2eU_{st}}{m}}. \qquad (9.5)$$

Pažvelgę į 9.4 formulę, matome, kad stabdymo įtampa U_{st} priklauso nuo fotoelektronų, išplėštų iš katodo paviršiaus, pradinės kinetinės energijos. Atliekant bandymą, pastebėta: kad ir kaip būtų keičiama fotokatodo apšvieta (didinamas arba mažinamas krintančios elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumas, bet nekeičiamas jos dažnis), stabdymo įtampa lieka pastovi. Vadinasi, nekinta ir išplėštų fotoelektronų pradinė kinetinė energija. Klasikinė elektromagnetinių bangų teorija šio fakto pagrįsti negalėjo.

Tačiau bandymas atskleidė dar vieną nuostabų faktą: fotokatodą apšviečiant vis kitokio dažnio spinduliuote, iš jo išplėštų fotoelektronų pradinė kinetinė energija kinta. Kad ir kokia būtų fotokatodo apšvieta, didėjant spinduliuotės dažniui, išplėštų fotoelektronų pradinė kinetinė energija didėja ir atvirkščiai. Krintančios spinduliuotės dažniui sumažėjus iki tam tikros mažiausios (ribìnės) vertės ν_{min}, fotoefektas nevyksta – iš katodo paviršiaus neišplėšiama nė vieno fotoelektrono. Ribinė krintančios spinduliuotės dažnio vertė priklauso nuo fotokatodo medžiagos cheminės sudėties ir paviršiaus būsenos.

Taigi bandymu buvo nustatyti tokie fotoefekto dėsniai:

1) per vienetinį laiką iš katodo paviršiaus išplėštų fotoelektronų skaičius yra tiesiogiai proporcingas krintančios elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumui (fotokatodo energinei apšvietai);

2) fotoelektronų didžiausia pradinė kinetinė energija priklauso nuo spinduliuotės dažnio, bet nepriklauso nuo jos intensyvumo;

*3) kiekvienai medžiagai būdingas tam tikras mažiausias (ribinis) spinduliuotės dažnis, kuriam esant dar vyksta fotoefektas. Šis dažnis vadinamas **fotoefèkto raudonąja ribà**.*

Išorinio fotoefekto lygtis

Albertui Einšteinui pavyko įveikti prieštaravimus, atsiradusius aiškinant fotoefekto dėsnius. 1905 m., apibendrinęs ir papildęs Planko kvantų hipotezę, jis sukūrė kvantinę šviesos teoriją. Remdamiesi ja, pabandykime paaiškinti išorinio fotoefekto dėsnius.

Fotokatodo paviršiuje esantys elektronai sugeria į jį krintančios spinduliuotės kvantus (fotonus) ir kiekvienas įgyja energijos $h\nu$. Aiškumo dėlei turime padaryti prielaidą, kad fotonas perduoda savo energiją tik vienam elektronui ir elektronai juda metale nesąveikaudami. Jeigu fotoelektrono sugerta energija yra didesnė už elektrono išlaisvinimo iš metalo darbą $A_{iš}$ arba jam lygi, tai fotoelektronas iš metalo išplėšiamas. ***Energijos kiekis, reikalingas elektronui išplėšti iš metalo, vadinamas elektròno išláisvinimo dárbu.*** Kita fotono energijos dalis virsta fotoelektrono kinetine energija. Remdamiesi energijos tvermės dėsniu, gauname:

$$h\nu = A_{iš} + \frac{mv_{max}^2}{2}. \qquad (9.6)$$

Šią lygtį pirmasis pateikė Albertas Einšteinas, todėl ji vadinama ***išorìnio fotoefèkto Eìnšteino lygtimì***. 9.6 lygtis paaiškina visus fotoefekto dėsnius. Iš jos išplaukia, kad fotoelektronų didžiausia kinetinė energija priklauso tik nuo krintančios į fotokatodą spinduliuotės dažnio ir elektrono išlaisvinimo iš metalo darbo $A_{iš}$, tačiau visiškai nepriklauso nuo spinduliuotės intensyvumo.

Fotoefekto raudonąją ribą atitinkanti Einšteino lygtis bus tokios išraiškos:

$$h\nu_{min} = A_{iš}.$$

Iš čia

$$\nu_{min} = \frac{A_{iš}}{h}. \qquad (9.7)$$

Už fotoefekto dėsnių atradimą ir reliatyvumo teorijos sukūrimą Albertui Einšteinui 1921 m. buvo paskirta Nobelio premija.

Klausimai ir užduotys ??

1. Išvardykite pagrindinius fotoefekto dėsnius.

2. Remdamiesi fotoefekto voltamperine charakteristika, paaiškinkite stabdymo įtampos fizikinę prasmę.

3. Ką vadiname elektrono išlaisvinimo darbu?

4. Parašykite išorinio fotoefekto Einšteino lygtį.

5. Elektrono išlaisvinimo iš kalio darbas $A_{iš(K)} = 3{,}5 \times 10^{-19}$ J. Nustatykite kalio fotoefekto raudonąją ribą.

(0,57 μm)

6. Cinko plokštelė veikiama spinduliuotės, kurios bangos ilgis 0,45 μm. Ar plokštelėje vyksta fotoefektas?

(Nevyksta)

7. Natrio fotoefekto raudonąją ribą atitinka 0,53 μm bangos ilgis. Apskaičiuokite elektrono išlaisvinimo iš natrio darbą. ($3{,}75 \cdot 10^{-19}$ J)

Mokomės spręsti uždavinius

1. Kokio didžiausio bangos ilgio šviesa sukelia fotoefektą, krisdama į platiną? Elektrono išlaisvinimo iš platinos darbas lygus $8{,}5 \cdot 10^{-19}$ J.

λ_{max} – ?	$A_{iš(Pt)} = 8{,}5 \cdot 10^{-19}$ J

Sprendimas

Fotoefekto raudonąją ribą atitinkantį šviesos bangos ilgį randame remdamiesi Einšteino lygtimi. Šiuo atveju fotoelektronų kinetinė energija lygi nuliui, todėl

$$A_{iš} = h\nu.$$

Iš čia

$$\nu = \frac{A_{iš}}{h}.$$

Šį dažnį atitinka bangos ilgis

$$\lambda_{max} = \frac{c}{\nu}.$$

Tada

$$\lambda_{max} = \frac{ch}{A_{iš}}.$$

Įrašę dydžių vertes ir apskaičiavę, gauname:

$$\lambda_{max} = \frac{3 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m/s} \cdot 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}}{8{,}5 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}} = 2{,}34 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}.$$

Atsakymas: $\lambda_{max} = 2{,}34 \cdot 10^{-7}$ m.

2. Kokiu didžiausiu greičiu fotoelektronai išlekia iš cezio, apšviesto spinduliuote, kurios bangos ilgis 0,4 μm?

v_{max} – ?	$\lambda = 0{,}4\ \mu\mathrm{m} = 4 \cdot 10^{-7}$ m $A_{iš(Cs)} = 3{,}2 \cdot 10^{-19}$ J

Sprendimas

Rašome fotoefekto Einšteino lygtį:

$$h\nu = A_{iš} + \frac{mv_{max}^2}{2}.$$

Iš jos išreiškiame v_{max}:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2(h\nu - A_{iš})}{m}}.$$

Kadangi $\nu = \frac{c}{\lambda}$, tai

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2}{m}\left(\frac{hc}{\lambda} - A_{iš}\right)}.$$

Įrašome dydžių vertes ir apskaičiuojame:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}}\left(\frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s} \cdot 3 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m/s}}{4 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}} - 3{,}2 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}\right)} =$$

$= 6{,}5 \cdot 10^{5}$ m/s.

Atsakymas: $v_{max} = 6{,}5 \cdot 10^{5}$ m/s.

Užduotys savarankiškam darbui

1. Apskaičiuokite ličio fotoefekto raudonąją ribą, žinodami, kad $A_{iš(Li)} = 3{,}8 \cdot 10^{-19}$ J. ($5{,}8 \cdot 10^{14}$ Hz)

2. Į platinos paviršių krinta šviesa, kurios bangos ilgis 100 nm. Kokiu didžiausiu greičiu elektronai išlėks iš platinos, kai $A_{iš(Pt)} = 8{,}5 \cdot 10^{-19}$ J? ($1{,}6 \cdot 10^{6}$ m/s)

3. Ar matysime fotoefektą, jeigu sidabro paviršių apšviesime ultravioletiniais spinduliais, kurių bangos ilgis 300 nm? $A_{iš(Ag)} = 6{,}9 \cdot 10^{-19}$ J. Atsakymą pagrįskite. (Nematysime)

4. Volframo fotoefekto raudonoji riba lygi 0,275 μm.

a) Apskaičiuokite elektrono išlaisvinimo iš volframo darbą. ($\approx 7{,}23 \cdot 10^{-19}$ J)

b) Nustatykite, kokį didžiausią greitį įgis iš volframo išlaisvinti elektronai, jeigu volframo paviršių apšviesime šviesa, kurios bangos ilgis 0,18 μm. ($\approx$ 0,92 Mm/s)

c) Kokia bus didžiausia tų elektronų energija? ($\approx 3{,}8 \cdot 10^{-19}$ J)

d) Ką reikia daryti, norint padidinti išlaisvintų elektronų energiją?

e) Kokią įtampą reikia prijungti prie elektrodų, norint sustabdyti elektronų išlaisvinimą iš volframo paviršiaus? ($\approx$ 2,38 V)

f) Kiek fotonų kas sekundę pasieks volframo paviršių, jeigu į jį krintančios šviesos galia bus lygi 10 W? ($\approx 9 \cdot 10^{18}$)

5. Metalinė plokštelė pirmą kartą apšviečiama 0,35 μm bangos ilgio, antrą kartą – 0,54 μm bangos ilgio šviesa. Iš plokštelės paviršiaus išlaisvintų fotoelektronų didžiausių greičių santykis lygus 2. Iš kokio metalo padaryta plokštelė? (Iš cezio)

6. Į metalo paviršių krinta $2 \cdot 10^{15}$ Hz dažnio šviesa. Fotoelektronus, kuriuos ji išlaisvina iš metalo, pavyksta visiškai sustabdyti prijungus 7 V įtampą. Fotoefektą sukeliančios šviesos dažnį padidinus iki $4 \cdot 10^{15}$ Hz, stabdymo įtampos vertė padidėja iki 15 V. Apskaičiuokite Planko konstantą. ($6{,}4 \cdot 10^{-34}$ J · s)

7. Parenkite referatą „Fotoefekto („elektroninių akių") taikymas praktikoje".

9.6. Fotoefekto taikymas

Pagrindinės sąvokos

Fotoelemeñtas, vidìnis fotoefèktas, užtvarìnis fotoefèktas.

Fotoelementas

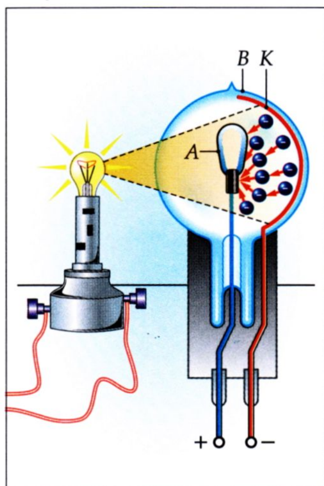
Fotoefektas svarbus ne tik dėl to, kad padėjo suprasti šviesos prigimtį. Jis tuoj pat buvo pritaikytas praktikoje – sukurti prietaisai šviesos srautams registruoti ir matuoti, šviesos energijai tiesiogiai paversti elektros energija ir šviesos signalams keisti elektriniais signalais. Visų jų veikimas pagrįstas fotoefektu. Vienas iš prietaisų, kurie elektromagnetinės spinduliuotės (šviesos) energiją keičia elektros srovės energija, yra ***fotoelemeñtas***. Pagal veikimo principą, sandarą ir taikymo sritis fotoelementai skirstomi į vakuuminius, dujinius, puslaidininkinius ir užtvarinius. Detaliau susipažinsime su vakuuminiu ir dujiniu fotoelementu.

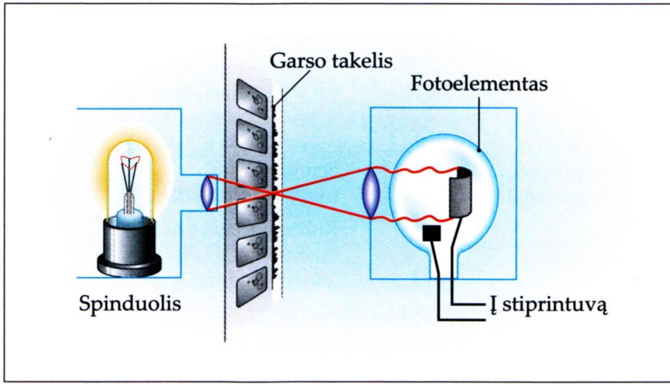
Vakuuminis fotoelementas

Šis prietaisas elektromagnetinės spinduliuotės (šviesos) energiją paverčia elektros energija. Fotoelementas susideda iš stiklinio baliono *B*, kuriame sudarytas vakuumas arba yra inertinių dujų (9.6.1 pav.). Dalis baliono vidinio paviršiaus padengta šviesai jautrios medžiagos sluoksniu, vadinamu fotokatodu *K*. Medžiagos fotoelementų katodams parenkamos atsižvelgiant į spinduliuotės spektrinę sudėtį. Pavyzdžiui, regimajai ir infraraudonajai spinduliuotei registruoti naudojami fotoelementai su cezio oksido katodu, ultravioletinei – su stibio-cezio katodu. Baliono centre įtaisytas metalinis žiedas arba retas tinklelis – anodas *A*. Fotokatodas prijungiamas prie įtampos šaltinio neigiamojo poliaus, anodas – prie teigiamojo. Spinduliuotę nukreipus į fotokatodą, iš jo paviršiaus išplėšiami fotoelektronai. Judėdami anodo link, jie sukuria grandinėje fotosrovę.

Fotokatodo ir anodo potencialų skirtumas parenkamas toks, kad grandine tekėtų soties fotosrovė. Kadangi ji neinertiška, tai tiksliai atkartoja šviesos kitimą. Dėl to šie prietaisai naudojami garsui atkurti kino juostoje (9.6.2 pav.), televizijoje vaizdo signalams pa-

9.6.1 pav.





9.6.2 pav.

versti elektriniais signalais, šviesos srauto stipriui ar apšvietai matuoti, taip pat daugeliui procesų automatiškai valdyti.

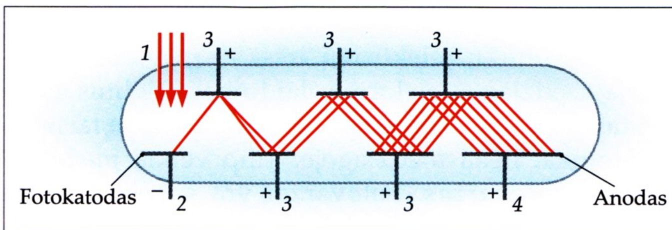
Derinant fotoelementus ir elektromagnetines reles, galima konstruoti įvairius „regimčius" automatinius įrenginius. Jie gali automatiškai įjungti ir išjungti gatvių apšvietimo elektrines grandines, švyturius, skaičiuoti konvejeriu slenkančias detales ir maisto produktų pakuotes. Konvejeriu slenkantys daiktai gali būti rūšiuojami pagal matmenis arba spalvą.

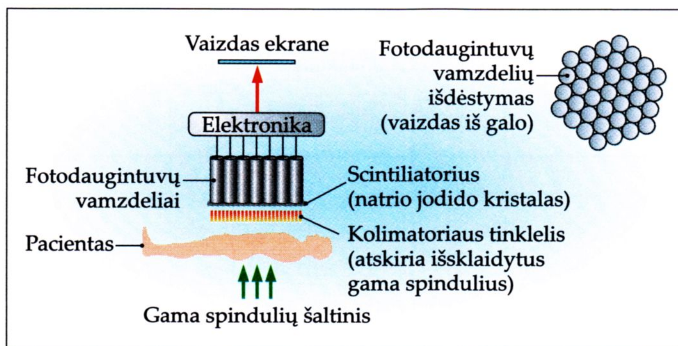
Fotoelektroninis daugintuvas

Išorinis fotoefektas taikomas ***fotoelektròniniame daugintuvè***. Tai vakuuminis prietaisas, kurio principinė veikimo schema parodyta 9.6.3 paveiksle.

Šviesos pluoštas nukreipiamas į fotokatodą *2*. Iš jo šviesa išlaisvina fotoelektronus, kuriuos elektrinis laukas pagreitina ir nukreipia paeiliui į vis naujus katodus *3* – vadinamuosius dinodùs. Jų paviršius padengtas medžiaga, kuriai būdinga didelė antrinė elektronų emisija. Kiekvienas pirminis elektronas iš dinodo išmuša keletą antrinių elektronų. Taip daugelį kartų sustiprėjęs elektronų srautas patenka į anodą *4*. Pirminiam elektronui perėjus dešimties pakopų dino-

9.6.3 pav.





9.6.4 pav.

dinę sistemą, sukurta elektros srovė gali sustiprėti 10^6 kartų.

Fotoelektroniniai daugintuvai naudojami labai silpniems šviesos signalams aptikti, jų intensyvumui matuoti, taip pat medicininės diagnostikos aparatuose (gama kamerose) apšvitos jonizuojančiąja spinduliuote silpnoms dozėms matuoti. Gama kamerą sudaro daug greta sudėtų fotoelektroninių daugintuvų, kurių sustiprintas signalas perduodamas į įrašymo įrenginį ar monitorių (9.6.4 pav.).

Dujinis fotoelementas

Fotoelementų jautrumą galima padidinti prileidus į stiklinį balioną praretintų inertinių argono ar neono dujų. Taip gaunamas ***dùjinis fotoelemeñtas***. Jame pagreitėję elektronai susiduria su argono ar neono molekulėmis ir jas jonizuoja. Atsiradę papildomi krūvininkai sustiprina fotoelemento soties fotosrovę ir kartu padidina jo jautrį. Tačiau dujiniai fotoelementai yra inertiškesni ir ne tokie stabilūs kaip vakuuminiai.

Vidinis ir užtvarinis fotoefektas

Kristaliniuose puslaidininkiuose ir dielektrikuose, be mums jau žinomo išorinio fotoefekto, gali vykti ir ***vidìnis fotoefèktas***. Jo esmę sudaro tai, kad, krisdama į medžiagą, spinduliuotė sukuria joje daugiau laisvųjų krūvininkų (elektronų ir skylių) ir dėl to padidėja medžiagos elektrinis laidumas. Vidinis fotoefektas skiriasi nuo išorinio tuo, kad atsiradę laisvieji krūvininkai lieka medžiagoje. Taip veikia ***puslaidininkìnis fotovar̃žas***. Fotovaržai yra gerokai pranašesni už vakuuminius fotoelementus: mažesni, piges-

ni, dešimtis kartų jautresni spinduliuotei. Fotovaržai taikomi silpnai spinduliuotei registruoti ir matuoti.

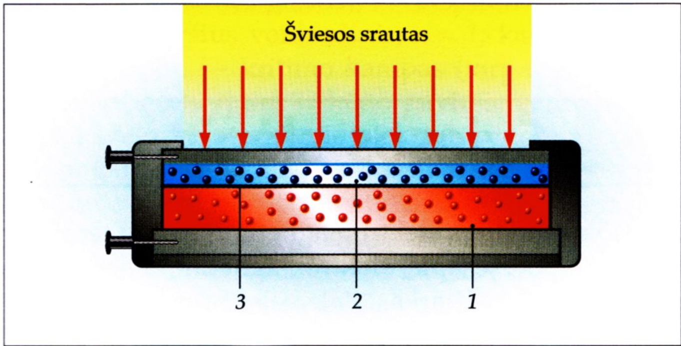
Elektrovaros atsiradimą dviejų skirtingo laidumo puslaidininkių sandūroje, veikiamoje spinduliuotės, vadiname ***užtvarinìù fotoefektù***. Juo grindžiamas saulės baterijų veikimas.

Saulės baterijos

Saulės baterijose krintančios spinduliuotės energija betarpiškai paverčiama elektros energija. Saulės baterijoms naudojamas silicis, germanis, sidabro sulfidas, selenas ir kitos medžiagos. Silicio saulės baterijos schema pateikta 9.6.5 paveiksle.

Elektroninio laidumo silicio plokštelė *1* padengiama plonu skylinio laidumo silicio sluoksniu *2*. Abiejų puslaidininkių sandūroje susidaro užtvarinis sluoksnis *3*. Krintantis į saulės baterijos paviršių fotonų srautas skylinio silicio sluoksnyje sukelia vidinį fotoefektą. Daugelis fotonų, turinčių pakankamai energijos, silicio sluoksnyje yra sugeriami ir kiekvienas iš jų sukuria po du laisvuosius krūvininkus: elektroną ir skylę. Veikiami sandūros elektrinio lauko, šie krūvininkai pereina atitinkamai į elektroninio ir skylinio laidumo sritis. Taip skylinėje-elektroninėje sandūroje susidaro papildomas potencialų skirtumas (elektrovara). Sujungus įrenginio elektrodus, grandine ima tekėti elektros srovė. Jos stipris priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo ir apkrovos varžos.

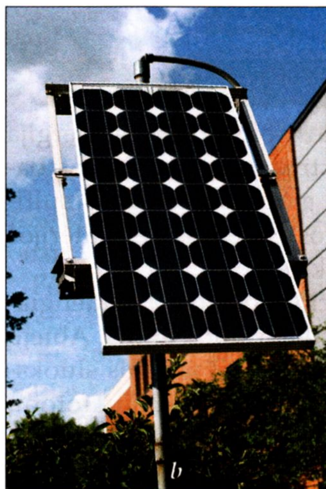
Tokios rūšies saulės baterijos įrengiamos kosminiuose palydovuose ar kosminėse stotyse elektroninei aparatūrai maitinti. Pietiniuose kraštuose, kur daug saulėtų dienų, saulės baterijų gaminama elektros energija pakeičia tiekiamą tradicinių elektrinių.



9.6.5 pav.

Lietuvojè taip pat bandoma ją naudoti. Energija, kurią sukaupia ant namų stogų įrengti saulės kolektoriai, naudojama vandeniui ir namams šildyti, taip pat kitiems tikslams. 9.6.6 paveiksle, *a*, *b* ir *c*, pateikta keletas saulės baterijų išdėstymo pavyzdžių.


a


b


c

9.6.6 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname fotoelementu?

2. Kokiu principu veikia vakuuminis fotoelementas?

3. Kuo iš esmės skiriasi išorinis fotoefektas nuo vidinio?

4. Paaiškinkite saulės baterijos veikimo principą.

5. Pateikite daugiau fotoefekto taikymo pavyzdžių.

6. Parenkite referatą „Saulės baterijos kosmose ir Žemėje".

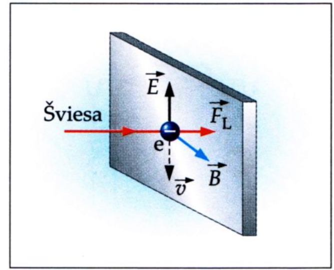
9.7. Šviesos slėgis

Pagrindinės sąvokos

Šviesõs slẽgis.

1865 m. sukūręs elektromagnetinių bangų teoriją ir iškėlęs hipotezę apie elektromagnetinę šviesos prigimtį, Džeimsas Klarkas Maksvelas numatė, kad šviesos bangos turi slėgti kūnus, į kuriuos jos krinta.

Šviesõs slė̃gio atsiradimas aiškinamas taip. Tarkime, kad šviesos banga krinta į metalinės plokštelės paviršių statmenai (9.7.1 pav.). Paviršiniai plokštelės elektronai, veikiami elektromagnetinės bangos sando $\vec{E}$ (t. y. elektrinio lauko), pasislenka greičiu $\vec{v}$ priešinga vektoriui $\vec{E}$ kryptimi. Periodiškai kintant elektrinio lauko stipriui $\vec{E}$, taip pat periodiškai kis ir paviršinių plokštelės elektronų judėjimo kryptis. Taigi banga privers elektronus svyruoti priešinga kryptimi, negu kinta elektrinio lauko vektorius $\vec{E}$. Gerokai masyvesni metalo kristalinės gardelės jonai dėl didelio dažnio į elektrinio lauko kitimą reaguoja silpnai.



9.7.1 pav.

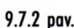
Šviesos bangos sandas $\vec{B}$ (t. y. magnetinis laukas) veikia judančius greičiu $\vec{v}$ elektronus Lorenco jėga $\vec{F}_L = e\vec{v}\vec{B}$. Pagal kairės rankos taisyklę ši jėga nukreipta į metalinę plokštelę statmenai jos paviršiui, kaip parodyta 9.7.1 paveiksle. Matome, kad Lorenco jėgos ir krintančios į metalinę plokštelę šviesos bangos kryptys sutampa. Lorenco jėgos kryptis nepriklauso nuo elektromagnetinės bangos sandų $\vec{E}$ ir $\vec{B}$ krypties. Vadinasi, šviesos banga tikrai turi slėgti plokštelės paviršių. Atstojamoji Lorenco jėga, veikianti paviršinius plokštelės elektronus, ir yra šviesos slėgimo jėga. Jos modulio ir plokštelės apšviestos dalies ploto santykis lygus šviesos slėgiui: $p = \frac{F_L}{S}$. Remiantis Maksvelo elektromagnetinių bangų teorija, buvo gauta tokia šviesos slėgio išraiška:

$$p = w(1 + r)\cos^2 i; \qquad (9.8)$$

čia w – tūrinis elektromagnetinės energijos tankis ($w = \frac{I}{c}$, $I = nh\nu$ – krintančiosios spinduliuotės intensyvumas, n – fotonų, krintančių į kūno vienetinio ploto paviršių per vienetinį laiką, skaičius, $h\nu$ – fotono energija, c – šviesos greitis), r – atspindžio koeficientas[1] (kai paviršius veidrodinis, $r = 1$; kai absoliučiai juodas, $r = 0$), i – kritimo kampas (tarp šviesos bangos sklidimo krypties ir kūno paviršiaus normalės).

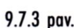
Maksvelo hipotezę apie elektromagnetinę šviesos prigimtį ir šviesos slėgį, o kartu ir 9.8 formulę patvirtino vėlesni eksperimentiniai šviesos slėgio matavimai. Šviesos slėgį į kietuosius kūnus pirmieji aptiko ir bandymais nustatė 1899 m. rusų fizikas Piotras Lebedevas ir 1903 m. amerikiečių fizikas Ernestas Nikolsas (*Ernst Nichols*, 1869–1924).

[1] Atspindžio koeficientas – atsispindėjusios nuo kūno paviršiaus šviesos bangos ir krintančios bangos intensyvumų santykis.


9.7.2 pav.

Lebedevo prietaisą šviesos slėgiui matuoti sudaro labai lengvas rėmelis, pakabintas ant plono kvarcinio siūlo (9.7.2 pav.). Rėmelis gali pasisukti apie vertikalią jo simetrijos ašį. Prie vertikalių rėmelio strypelių priklijuoti labai ploni (iki 0,01 mm storio) skridinėliai, pagaminti iš metalinės folijos. Vieno skridinėlio paviršius yra veidrodinis, kito – juodas. Rėmelis uždengtas stikliniu gaubtu, iš kurio išsiurbtas oras. Šviesos pluoštas lęšiais ir veidrodžiais nukreipiamas į skridinėlius. Juos veikiantis šviesos slėgis aptinkamas ir apskaičiuojamas pagal kvarcinio siūlo pasisukimo kampą. Veidrodinį ir juodą skridinėlių paviršių šviesos pluoštas slegia nevienodai. Dėl to atsiranda sukimo momentas, kuris pasuka rėmelį, taigi ir kvarcinį siūlą. Siūlo pasisukimo kampas matuojamas veidrodinės atskaitos metodu (9.7.3 pav.). Pagal šį kampą nustatoma skridinėlių paviršius veikianti jėga ir apskaičiuojamas slėgis.

Reikia pasakyti, kad šviesos slėgis į kietuosius kūnus yra labai mažas. Pavyzdžiui, giedrą vidurdienį saulės spinduliai, krisdami statmenai, slegia 1 m^2 ploto juodą plokštelę ($r \approx 0$), kurios sugerties galia apie 0,13 W, $4 \cdot 10^{-6}$ N jėga (sukelia $4 \cdot 10^{-6}$ Pa slėgį). Todėl bet koks pašalinis poveikis daro įtaką šviesos slėgio matavimo rezultatams. Kas jį gali sukelti? Apšviestas skridinėlių paviršius įkaista labiau už neapšviestą, todėl susidaro temperatūros skirtumas. Iš stiklinio gaubto, po kuriuo yra rėmelis, neįmanoma išsiurbti viso oro. Gaubte likusios oro molekulės, atsitrenkdamos į skirtingai įkaitusius skridinėlių paviršius, juos slegia nevienodai. Nuo apšviesto (aukštesnės temperatūros) skridinėlio paviršiaus atsispindėjusių oro molekulių energija, o kartu ir greitis yra didesni negu atsispindėjusių nuo neapšviesto. Todėl apšviestai skridinėlio pusei oro molekulės perduoda didesnį judesio kiekį. Vadinasi, apšviestą skridinėlio pusę, be šviesos slėgio, dar veikia atstojamasis oro molekulių slėgis.


9.7.3 pav.

Kvarcinis siūlas

Šviesa

Naudodamas labai plonus skridinėlius, Lebedevas sėkmingai įveikė bandymo sunkumus. Jo išmatuotos šviesos slėgio į kietųjų kūnų paviršių vertės buvo artimos toms, kurias numatė Maksvelas. Taip buvo patvirtinta Maksvelo hipotezė apie elektromagnetinę šviesos prigimtį.

Vėliau (1907–1910 m.) Lebedevas atliko dar subtilesnį bandymą – aptiko ir išmatavo šviesos slėgį į du-

jas. Jo darbai parodė, kad šviesa dujas slegia šimtus kartų mažiau nei kietuosius kūnus. Sklisdama dujomis, šviesa jas turi slėgti. Pirmasis tokią prielaidą padarė vokiečių mokslininkas Johanas Kepleris, nagrinėdamas kometų uodegų formas. Kometai artėjant prie Saulės, jos uodega, sudaryta iš dujų ir dulkių, dėl šviesos slėgio į jas ilgėja ir krypsta į priešingą nuo Saulės pusę (žr. 11.5.6 pav.).

Šviesos slėgį paaiškina ne tik banginė, bet ir kvantinė šviesos teorija. Anksčiau nagrinėtas fotoefektas patvirtino, kad fotonai, be energijos, turi masę ir judesio kiekį (žr. 9.3 formulę). Dalis jų srauto, krintančio į kūno paviršių, yra sugeriama, o dalis atsispindi. Sąveikaudami su kūnu, fotonai perduoda jam judesio kiekį. Pagal antrąjį Niutono dėsnį kūno judesio kiekio pokytis per vienetinį laiką rodo, kad kūną veikia jėga. Ji verčia kūną judėti (9.7.2 paveiksle rėmelis su skridinėliais pasisuka). Vadinasi, šios jėgos priežastis yra fotonų srauto, krintančio į kūno paviršių, slėgimo jėga.

Šviesos slėgis atsiranda vykstant įvairiems gamtos reiškiniams. Žvaigždžių viduje, kur temperatūra siekia dešimtis milijonų kelvinų, elektromagnetinės spinduliuotės sukeliamas slėgis yra milžiniškas. Jis ir gravitacijos jėgos lemia procesus, vykstančius žvaigždėse. Šviesos slėgis stabdo skriejančius kosminius aparatus.

Klausimai ir užduotys ??

1. Paaiškinkite šviesos slėgio reiškinį, remdamiesi Maksvelo elektromagnetine ir kvantine šviesos teorija.

2. Kada šviesa slegia labiau: kai krinta į juodą ar kai į veidrodinį paviršių?

3. Saulės spinduliuotės slėgis į Žemės paviršių $4{,}7 \times 10^{-4}$ Pa. Apskaičiuokite, kiek energijos kas sekundę krinta į 1 m^2 ploto paviršių, statmeną spinduliams. (141 kJ)

4. Plokščiasis veidrodis apšviestas 0,5 μm bangos ilgio šviesa. Per sekundę į jo vienetinio ploto paviršių krinta $2 \cdot 10^{21}$ fotonų. Apskaičiuokite šviesos slėgį. ($5{,}3 \cdot 10^{-6}$ Pa)

5. Parenkite referatą „Banginė ir dalelinė šviesos prigimtis".

9.8. Bangos-dalelės dvejopumas

Šiame skyriuje aprašyti reiškiniai neabejotinai įrodo dalelinę (kvantinę) šviesos prigimtį. Antra vertus, šviesos interferencija, difrakcija ir poliarizacija, nagrinėta 8 skyriuje, patvirtina banginę jos prigimtį. Vis dėlto ar galime dabar atsakyti, kas yra šviesa: nenutrūkstama spinduolio elektromagnetinė spinduliuotė ar netvarkingai skleidžiamų atskirų fotonų srautas? Šviesai priskiriamos ir dalelinės (kvantinės), ir banginės savybės, todėl gali atrodyti, kad žinių apie šviesos prigimtį mums nepakanka.

Vienas svarbiausių XX a. fizikos laimėjimų buvo tas, kad pavyko atsikratyti prieštaros tarp elektromagnetinės spinduliuotės banginių ir dalelinių savybių. Diskretiškumo savybės, būdingos šviesos kvantams, nepaneigia tolydumo savybės, priskiriamos elektromagnetinei spinduliuotei. ***Šviesa tuo pačiu metu turi ir diskrečiųjų fotonų, ir tolydžiųjų elektromagnetinių bangų savybių.*** Šios skirtingos savybės išryškėja dėsningai. Didėjant spinduliuotės dažniui (sklindant trumpabangiams spinduliams), labiau pastebimos kvantinės šviesos savybės. Tai patvirtina fotoefekto raudonoji riba. Kai elektromagnetinės spinduliuotės dažnis mažas (skleidžiami ilgabangiai spinduliai), ryškesnės jos banginės savybės. Todėl šviesos interferenciją, difrakciją ir poliarizaciją gerai paaiškina banginė optika.

Atskirai reikėtų aptarti trumpabangių spindulių, kaip antai rentgeno ir gama spindulių, bangines savybes. Tyrimams naudojant paprastas difrakcines gardeles, šių spindulių banginės savybės yra labai neryškios. Jos išryškėja tada, kai rentgeno ir gama spindulių difrakcija stebima, vietoj paprastos difrakcinės gardelės imant kietųjų kūnų kristalinę gardelę.

Vadinasi, prieštaros tarp dalelinių ir banginių šviesos savybių lyg ir nėra. Jos atspindi skirtingus, tačiau kartu glaudžiai susijusius elektromagnetinės spinduliuotės sąveikos su medžiaga ir jos sklidimo dėsningumus. Dalelinės (kvantinės) savybės susijusios su faktu, kad skleidžiamos spinduliuotės energija, judesio kiekis ir masė sukaupta fotonuose, o banginės –

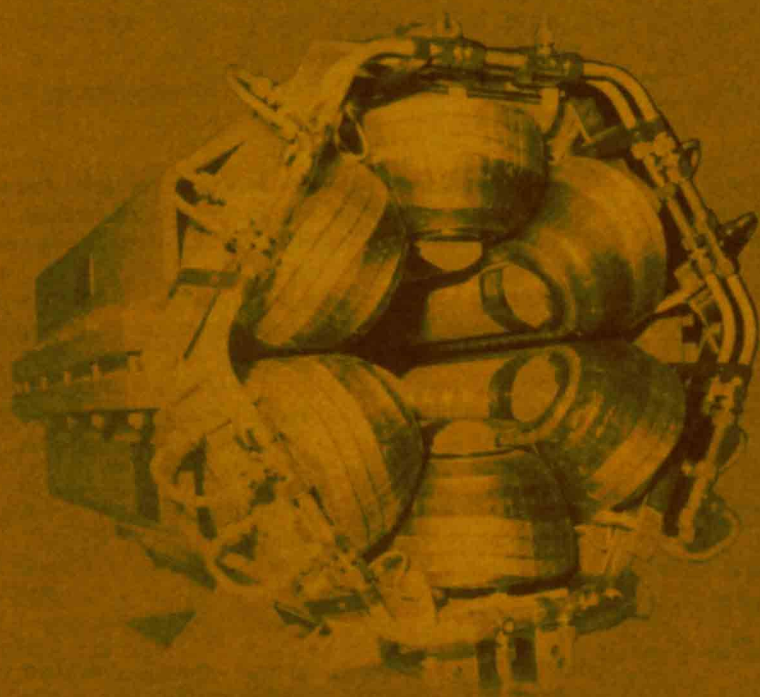
su fotonų pasiskirstymo erdvėje dėsningumais, nurodančiais fotonų buvimo tam tikruose erdvės taškuose tikimybes. Juk, šviesai sklindant pro kurią nors optinę sistemą, pavyzdžiui, pro difrakcinę gardelę, dėl sąveikos su medžiaga pakinta fotonų pasiskirstymas erdvėje. Dėl to, šviesos sklidimo kelyje pastačius ekraną, jame matomas difrakcinis vaizdas. Kaip jau žinome, įvairių ekrano taškų apšvieta yra tiesiogiai proporcinga per vienetinį laiką į juos krintančių fotonų energijai. Fotonų bangines savybes rodo ir tai, kad neįmanoma tiksliai nurodyti, į kurį ekrano tašką pateks fotonas, perėjęs pro optinę sistemą. Todėl galima kalbėti tik apie atskiro fotono pataikymo į skirtingus ekrano taškus tikimybes.

Taigi fotonai kokybiškai skiriasi nuo Niutono šviesos dalelių. Vadinasi, taikyti klasikinį aprašymą objektams, kurių prigimtis yra neklasikinė, negalima. Fotonai, kaip ir kitos elementariosios dalelės, nepaklūsta klasikinės mechanikos dėsniams. Šių dalelių dėsningumus nagrinėja kvantinė mechanika, kurios mokykloje nesimokoma. Todėl tam tikra prieštara visada atsiras, jeigu mikropasaulio objektus bandysime apibūdinti klasikinės fizikos dėsniais.

Skyriaus „Kvantinė optika“ apibendrinimas

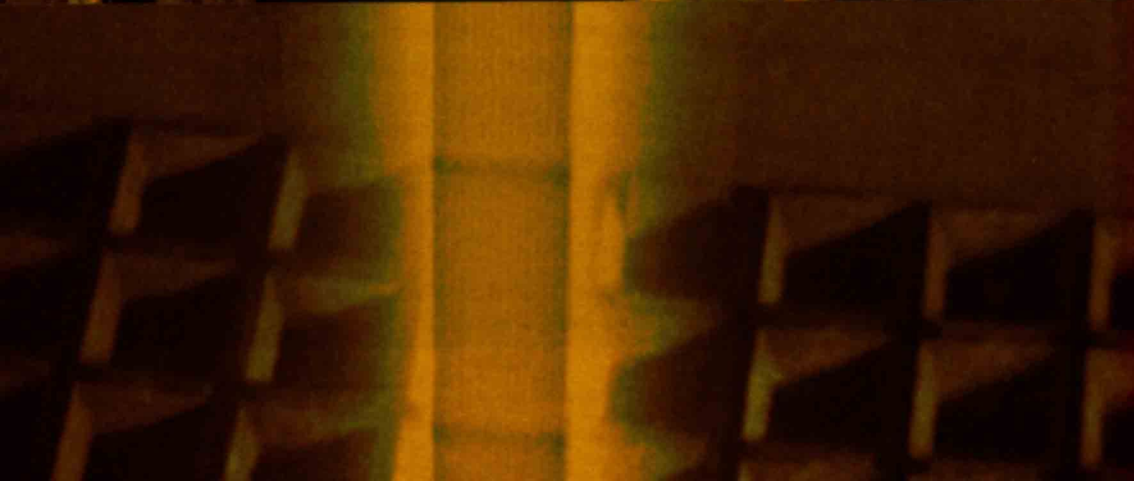
Pusiausviroji šiluminė spinduliuotė	Termiškai izoliuotos kūnų sistemos šiluminė spinduliuotė vadinama pusiausvirąja šilumine spinduliuote.
Juodasis spinduolis	Juodasis spinduolis yra idealus spinduliuotės imtuvas. Jo sugerties geba lygi vienetui (spinduolis sugeria visą į jį krintančią spinduliuotę).
Spinduliuotės spektras	Kūno (spinduolio) skleidžiamos spinduliuotės spektrinių linijų visuma vadinama spinduliuotės spektru.
Ištisinis spektras	Įkaitintų iki aukštos temperatūros kietųjų kūnų, skysčių ir tankių dujų spinduliuotės spektras yra ištisinis (tolydus).
Juostinis spektras	Molekulių skleidžiamas spektras vadinamas juostiniu.
Linijinis spektras	Aukštos temperatūros tarpusavyje nesąveikaujančių dujų atomų spinduliuotės spektras yra linijinis.
Sugerties spektras	Spinduliuotės sugerties linijos vadinamos sugerties spektru.
Spektrinė analizė	Spektrinė analizė – tai medžiagos kokybinės ir kiekybinės sudėties nustatymas pagal jos spektrą.
Planko hipotezė	Elektromagnetinę spinduliuotę atomai skleidžia arba sugeria ne tolygiai, o atskiromis energijos porcijomis – šviesos kvantais, arba fotonais.
Planko konstanta	$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J · s.
Fotoefektas	Elektronų išplėšimas iš medžiagos, kurią veikia elektromagnetinė (šviesos) spinduliuotė, vadinamas išoriniu fotoefektu.
Fotoelektronas	Dėl šviesos poveikio iš metalinės plokštelės paviršiaus išplėštas elektronas vadinamas fotoelektronu.
Fotosrovė	Fotoelektronų, kuriuos spinduliuoja apšviestas elektrodas, sukurta elektros srovė vadinama fotosrove.

Soties fotosrovė	Esant tam tikram potencialų skirtumui, visi iš metalinės plokštelės išplėšti fotoelektronai pasiekia anodą. Didžiausio stiprio fotosrovė, kuri tuo metu teka, vadinama soties fotosrove.
Stabdymo įtampa	Įtampa U_{st}, kuriai esant fotosrovė nustoja tekėti, vadinama stabdymo įtampa.
Fotoefekto dėsniai	1. Per vienetinį laiką iš katodo paviršiaus išplėštų fotoelektronų skaičius yra tiesiogiai proporcingas krintančiosios elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumui (fotokatodo energinei apšvietai). 2. Fotoelektronų didžiausia pradinė kinetinė energija priklauso nuo krintančiosios spinduliuotės dažnio, bet nepriklauso nuo jos intensyvumo. 3. Kiekvienai medžiagai būdingas tam tikras mažiausias (ribinis) spinduliuotės dažnis, kuriam esant dar vyksta fotoefektas. Šis dažnis vadinamas fotoefekto raudonąja riba.
Išlaisvinimo darbas	Energijos kiekis, reikalingas elektronui išplėšti iš metalo, vadinamas elektrono išlaisvinimo darbu.
Fotoefekto lygtis	$$h\nu = A_{iš} + \frac{mv^2_{max}}{2}.$$ Fotoelektronų didžiausia kinetinė energija priklauso tik nuo krintančios į fotokatodą spinduliuotės dažnio ν ir elektrono išlaisvinimo iš metalo darbo $A_{iš}$.
Vidinis fotoefektas	Krisdama į medžiagą, spinduliuotė sukuria joje daugiau laisvųjų krūvininkų (elektronų ir skylių) ir dėl to padidėja elektrinis medžiagos laidumas. Vidinio fotoefekto metu atsiradę laisvieji krūvininkai lieka medžiagoje.
Užtvarinis fotoefektas	Elektrovaros atsiradimas dviejų skirtingo laidumo puslaidininkių sandūroje, veikiamoje spinduliuotės, vadinamas užtvariniu fotoefektu.
Šviesos slėgis	Metalinės plokštelės paviršinius elektronus veikia elektromagnetinės bangos sandai $\vec{E}$ (elektrinio lauko) ir $\vec{B}$ (magnetinis laukas). Dėl sando $\vec{B}$ poveikio atsiranda atstojamoji Lorenco jėga, kuri ir yra ta jėga, kuria šviesa slegia plokštelės paviršių. Šviesos slėgis $p = w(1 + r) \cos^2 i$; čia w – krintančiosios spinduliuotės elektromagnetinio lauko energijos tūrinis tankis, r – atspindžio koeficientas, i – kampas tarp šviesos bangos sklidimo krypties ir plokštelės paviršiaus normalės.
Bangos-dalelės dvejopumas	Šviesa vienu metu turi ir diskrečiųjų fotonų, ir tolydžiųjų elektromagnetinių bangų savybių.



Atomo fizika





10 Atomo ir branduolio fizika

Šiame skyriuje praplėsite žinias apie atomo sandarą ir atomo branduolį, nagrinėsite radioaktyvumo reiškinį, susipažinsite su elementariųjų dalelių stebėjimo ir registravimo prietaisais bei modeliais, plačiau gvildensite branduolines reakcijas, urano branduolio dalijimąsi, grandinines branduolines reakcijas, branduolinius reaktorius, termobranduolines reakcijas, sužinosite apie jonizuojančiosios spinduliuotės poveikį gyviesiems organizmams, aptarsite branduolinės taršos ekologines problemas.

10.1. Planetinis atomo modelis ir jo ribotumas

Pagrindinės sąvokos

Tòmsono atòmo mòdelis,
Rèzerfordo atòmo mòdelis,
planètinis atòmo mòdelis,
Bòro postulãtai.

Tomsono atomo modelis

1897 m. anglų fizikas Džozefas Džonas Tomsonas (*Joseph John Thomson*, 1856–1940), tyrinėdamas elektros išlydį paretintose dujose, atrado pirmąją elementariąją dalelę – elektroną. Vėliau eksperimentiniais tyrimais buvo įrodyta, kad elektronai įeina į kiekvieno elemento atomo sudėtį. Taip prasidėjo atomo sandaros tyrinėjimų era.

1903 m. elektrono atradėjas Tomsonas pasiūlė pirmąjį atomo modelį. Anot Tomsono, teigiamasis atomo krūvis užima visą atomą ir yra pasiskirstęs jame vienodu tankiu, o neigiamieji elektronai tame atome išsidėstę tarsi razinos kekse (10.1.1 pav.).

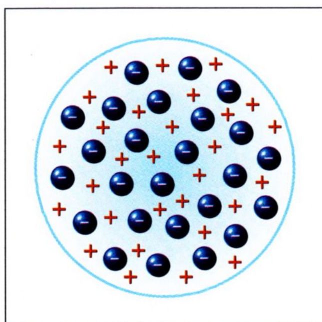


Džozefas Džonas Tomsonas

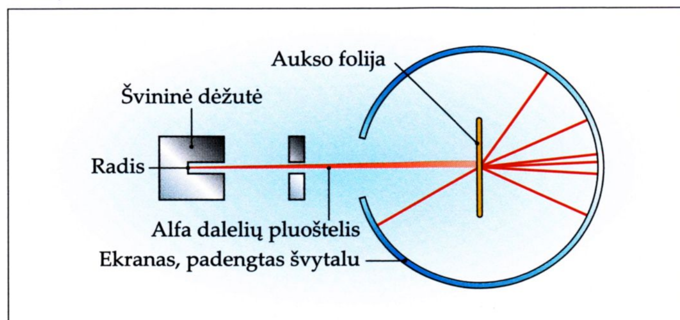
Rezerfordo atomo modelis

1911 m. Tomsono mokinys Ernestas Rezerfordas (*Ernest Rutherford*, 1871–1937) atliko bandymus, kurie paneigė mokytojo atomo modelį. Buvo įrodyta, kad teigiamasis elektros krūvis pasiskirstęs ne po visą atomą, o tik mažoje jo dalyje. Rezerfordas pasiūlė atomą zonduoti radžio skleidžiama alfa spinduliuote, t. y. alfa dalelėmis. Tuo metu jau buvo žinoma, kad alfa dalelės masė apytiksliai 7000 kartų didesnė negu elektrono. Teigiamasis jos krūvis lygus dvigubam

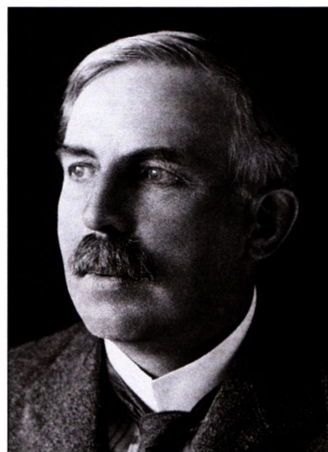
10.1.1 pav.



10.1.2 pav.

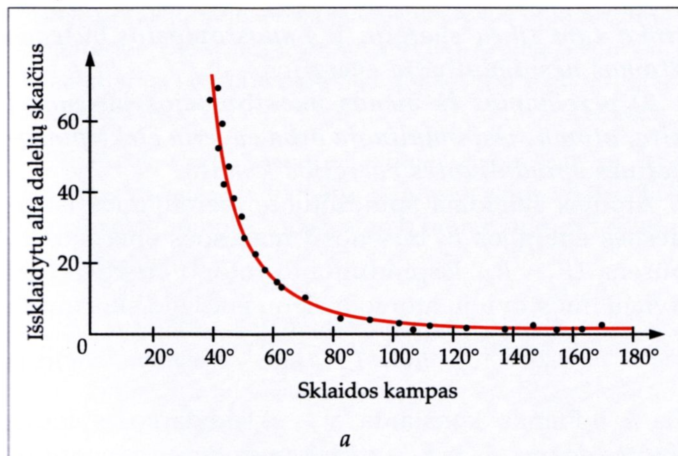


elektrono krūvio moduliui (+2*e*). Šiomis dalelėmis Rezerfordas apšaudė sunkiųjų elementų atomus. Jo bandymo schema pavaizduota 10.1.2 paveiksle. Iš švininės dėžutės išgręžtu kanalu sklindantis siauras pavienių alfa dalelių pluoštas buvo nukreipiamas į tiriamos medžiagos (aukso) foliją. Dauguma alfa dalelių pralėkdavo ją daugiau ar mažiau nukrypdamos nuo pradinės linkmės. Pasiekusios ekraną, padengtą švytalu, jos sukeldavo šviesos žybsnius, kurie ekrane susiliedavo į apskritą šviesią dėmelę. Išėmus aukso foliją, dėmelė sumažėdavo. Visiškai atsitiktinai buvo pastebėta, kad nedidelis skaičius alfa dalelių (apytiksliai viena iš dešimties tūkstančių) nukrypdavo nuo pradinės linkmės didesniu negu 90° kampu arba netgi atšokdavo atgal (10.1.3 pav. *b*). Būdinga išskaidytų alfa dalelių pasiskirstymo priklausomybė nuo sklaidos kampo (laipsniais) pavaizduota 10.1.3 paveiksle, *a*.

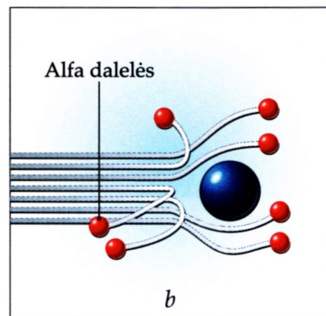

Ernestas Rezerfordas

Iš tikrųjų alfa dalelės susidūrimas su elektronu, kurio masė apytiksliai 7000 kartų mažesnė negu alfa dalelės, negalėjo taip pakeisti jos trajektorijos. Dalelė galėjo būti atblokšta tik tada, kai teigiamasis atomo krūvis ir masė sukoncentruoti mažoje erdvės srityje. Išanalizavęs daugybės bandymų rezultatus, Rezerfordas pasiūlė branduolinį atomo modelį. Jo esmę sudaro tai, kad atomas sudarytas iš mažo masyvaus branduolio, kuriame sutelktas visas teigiamasis krūvis, ir elektronų debesies. Kad, veikiami Kulono traukos jėgų, elektronai nenukristų ant branduolio, jie turi

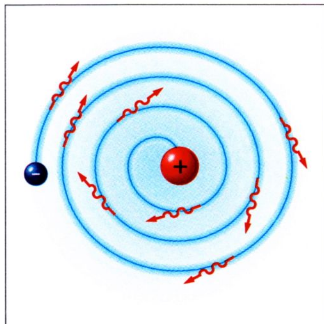
10.1.3 pav.



a



b

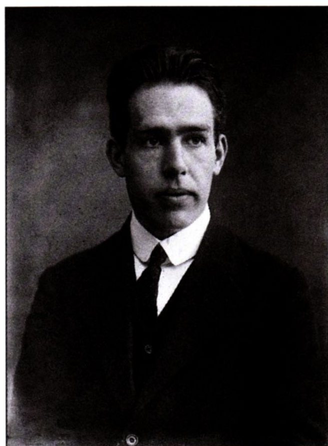


10.1.4 pav.

skrieti aplink jį. Rezerfordas manė, kad atomo sandara primena Saulės sistemą, todėl toks atomo modelis buvo pavadintas ***planètiniu***.

Branduolinis atomo modelis gerai paaiškino alfa dalelių sklaidą, tačiau susidūrė su kitais principiniais sunkumais – negalėjo pagrįsti atomo egzistavimo ir pastovumo. Pagal Maksvelo elektrodinamikos dėsnius su pagreičiu judantis elektronas turi skleisti elektromagnetinę spinduliuotę, kurios dažnis lygus elektrono sukimosi apie branduolį dažniui. Spinduliuodamas jis turėtų netekti energijos. Dėl to jo skriejimo greitis ir orbitos spindulys sumažėtų, o elektronas nukristų ant branduolio – atomas nustotų egzistavęs (10.1.4 pav.). Vadinasi, klasikinės fizikos požiūriu branduolinis atomas yra nepastovus, egzistuoja trumpai, kol išspinduliuoja visą savo energiją. Tačiau iš tikrųjų taip nėra – atomai yra stabilūs ir nesužadinti gali egzistuoti labai ilgai. Ir vėl atsiranda prieštara, kuri dar kartą patvirtina, kad mikropasaulio reiškinių dėsningumų negalima paaiškinti remiantis klasikinės fizikos dėsniais.

Boro postulatai


Nilsas Boras

Išeitį iš šios keblios padėties 1913 m. pasiūlė danų fizikas Nilsas Boras (*Niels Bohr*, 1885–1962). Jam kilo mintis susieti elektrono orbitos pastovumą su energijos kvanto egzistavimu. Šios minties vedamas, Boras suformulavo du ***postulatùs*** (lot. *postulatum* – reikalavimas), nusakančius atomų savybes:

1) atominė sistema gali būti tik ypatingų nuostovių̨jų, arba kvantinių, būsenų, kurių kiekvieną atitinka tam tikra energija E_n; nuostoviosios būsenos atomas nespinduliuoja energijos;

2) pereidamas iš vienos nuostoviosios būsenos į kitą, atomas išspinduliuoja arba sugeria elektromagnetinės spinduliuotės energijos kvantą.

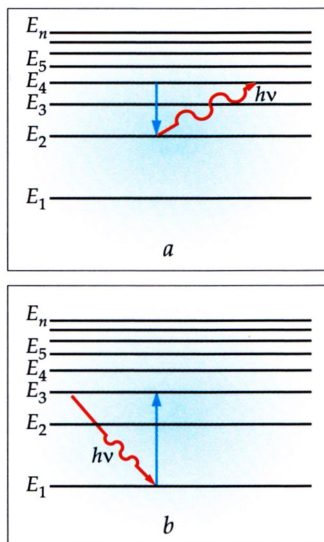
Atomas skleidžia spinduliuotę, pereidamas iš didesnės energijos E_2 būsenos į mažesnės energijos E_1 būseną ($E_2 > E_1$). Išspinduliuoto fotono energija lygi dviejų nuostoviųjų atomo būsenų energijų skirtumui:

$$h\nu = E_2 - E_1; \qquad (10.1)$$

čia h – Planko konstanta, ν – skleidžiamos spinduliuotės dažnis, E_2 ir E_1 – atitinkamos būsenos energija.

Jei atomas energiją sugeria, tai jis pereina iš mažesnės energijos būsenos į didesnės energijos būseną.

Atomo sužadinimo fizikinį procesą suprasime lengviau, jei pasiremsime ***atòmo enèrginių bū́senų diagramà*** (10.1.5 pav.). Joje kiekvieną nuostoviąją (kvantinę) atomo būseną vaizduoja horizontali linija. Pirmoji linija E_1 atitinka pagrindinę, arba mažiausios energijos, atomo būseną, o visos kitos (E_2, E_3, ..., E_n), esančios virš pirmosios, – sužadintąsias atomo būsenas. Atomas virsta sužadintu tik sugėręs tam tikros energijos fotoną. Atomo perėjimas iš vienos energinės būsenos į kitą vaizduojamas vertikaliomis rodyklėmis. Pavyzdžiui, pereidamas iš sužadintosios būsenos E_4 į sužadintąją būseną E_2 (10.1.5 pav., *a*), atomas šviesos kvantą išspinduliuoja, o, pereidamas iš pagrindinės būsenos E_1 į sužadintąją būseną E_3 (10.1.5 pav., *b*), – sugeria.



10.1.5 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Apibūdinkite planetinį atomo modelį.

2. Pasakykite Boro postulatus.

3. Paaiškinkite, kodėl alfa dalelės ir aukso atomo branduolio gravitacijos jėga turi mažai įtakos alfa dalelių sklaidai.

4. Kodėl atomų elektronai beveik neturi įtakos alfa dalelių sklaidai?

5. Koks prieštaravimas iškilo tarp Rezerfordo branduolinio atomo modelio ir klasikinės fizikos dėsnių?

6. Apskaičiuokite alfa dalelę veikiančios aukso atomo branduolio elektrinės jėgos ir gravitacijos jėgos santykį, kai atstumas tarp alfa dalelės ir aukso atomo branduolio lygus 10^{-14} m. ($2,5 \cdot 10^{35}$)

7*. Aukso atomų branduoliai išsklaido alfa daleles, kurių kinetinė energija lygi 10^{-12} J. Nustatykite, kokiu mažiausiu atstumu prie aukso atomo branduolio gali priartėti šios dalelės:

a) alfa dalelės; ($3,6 \cdot 10^{-12}$ cm)

b) protonas, turėdamas tiek pat energijos, kiek ir alfa dalelė; ($0,2 \cdot 10^{-12}$ cm)

c) neutronas, turėdamas tiek pat energijos, kiek ir alfa dalelė.

8. Vandenilio atomas išspinduliavo fotoną, kurio bangos ilgis 0,486 μm. Kiek pakito atomo energija?
($4,1 \cdot 10^{-19}$ J)

9. Apšvitintų elektronais gyvsidabrio garų atomų energija padidėjo 4,9 eV. Kokio bangos ilgio fotoną išspinduliuos gyvsidabrio atomas, pereidamas į nesužadintąją būseną? (0,25 μm)

10. Deguonies atomui jonizuoti reikia 14 eV energijos. Kokio dažnio spinduliuotė gali jonizuoti šį atomą?
($3,4 \cdot 10^{15}$ Hz)

11. Vandenilio atomo elektronui pereinant iš ketvirtosios nuostoviosios būsenos į antrąją, buvo išspinduliuotas fotonas, kurio energija $4,04 \cdot 10^{-19}$ J. Apskaičiuokite šios spektro linijos bangos ilgį. (0,49 μm)

10.2. Vandenilio atomo modelis

Pagrindinės sąvokos

Jùdesio kiẽkio momeñtas,

nuostovióji enèrginė bū́sena.

Nilsas Boras suformuluotus postulatus taikė kurdamas paprasčiausios atòminės sistèmos – vandenilio atomo – teoriją. Jam buvo svarbu rasti vandenilio atomo skleidžiamos spinduliuotės dažnius (spektrą). Remiantis antruoju Boro postulatu, tai įmanoma tik žinant vandenilio atomo nuostoviųjų būsenų energiją.

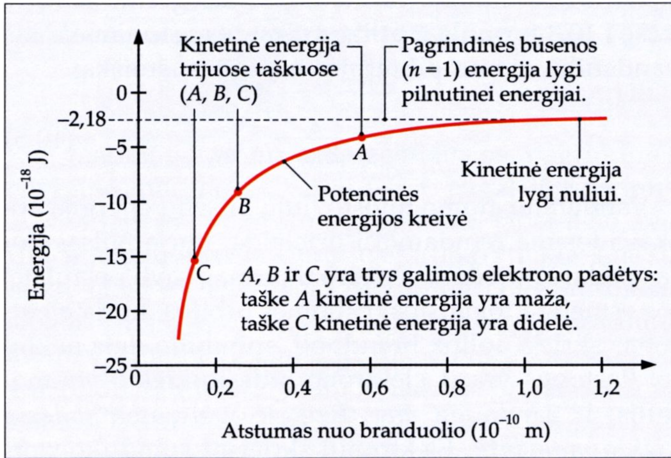
Vandenilio (H) atomas yra elektrono ir branduolio (protono) sistema. Jos pilnutinė energija

$$E = E_k + E_p; \qquad (10.2)$$

čia E_k – vandenilio atomo elektrono kinetinė energija, E_p – elektrono ir protono sąveikos potencinė energija Kulono jėgų lauke. Įrašę atitinkamas energijos išraiškas, gauname:

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}; \qquad (10.3)$$

čia m – elektrono masė, v – jo greitis, e – elektrono krūvis, r – atstumas nuo elektrono iki branduolio, ε_0 – elektrinė konstanta. Potencinė energija yra neigiama, nes sąveikaujančių elektringųjų dalelių krūviai



10.2.1 pav.

įvairiaženkliai. Elektrono ir protono sistemos potencinės energijos priklausomybė nuo atstumo tarp šių elektringųjų dalelių pateikta 10.2.1 paveiksle. Kai elektronas tolsta nuo atomo branduolio, jo kinetinė energija mažėdama artėja prie nulio. Antra vertus, kuo arčiau branduolio yra elektronas, tuo didesnis jo greitis ir tuo mažesnė potencinė energija. Tačiau pilnutinė sistemos energija visą laiką yra pastovi. Vandenilio atomo ji lygi 13,55 eV[1].

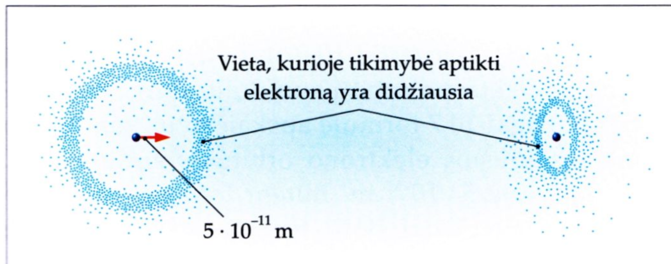
Apskritimine orbita aplink branduolį judančiam elektronui Kulono jėga suteikia įcentrinį pagreitį, todėl

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}. \tag{10.4}$$

Reikia pabrėžti, kad, nagrinėdamas vandenilio atomą, Boras taikė supaprastintą modelį, t. y. teigė, kad elektronas skrieja aplink nejudantį vandenilio branduolį apskritiminėmis orbitomis. Iš tiesų šis judėjimas yra kur kas sudėtingesnis. 10.2.2 paveiksle pavaizduota galima elektrono, skriejančio apie atomo branduolį, orbita.

[1] Atomo fizikoje energiją įprasta matuoti elektronvoltais (eV). Primename, kad 1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J.

10.2.2 pav.



Iš 10.4 formulės išreiškę elektrono greitį, jo vertę įrašę į 10.3 formulę ir atlikę veiksmus, gauname tokią vandenilio atomo pilnutinės energijos išraišką:

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r}. \qquad (10.5)$$

Vandenilio atomo nuostoviųjų būsenų energiją apskaičiuosime remdamiesi prielaida, kurią Nilsas Boras padarė norėdamas pagrįsti pirmąjį savo postulatą. Jos esmė yra tokia: apskritiminės orbitos, kuria elektronas skrieja aplink branduolį, spindulio ilgis nekinta. Pastovus yra ir elektrono judesio kiekio mv modulis, ir sandauga mvr, fizikoje vadinama ***jùdesio kiẽkio momentù***. Elektronui skriejant spindulio r orbita, atomas yra tam tikros ***nuostoviõsios enèrginės bū́senos*** ir jo energija nekinta. Taip samprotaudamas Boras padarė išvadą, kad elektrono judesio kiekio momentas, kai vandenilio atomas yra skirtingų nuostoviųjų energinių būsenų, yra diskretus (netolydus), t. y. dydžio $\frac{h}{2\pi}$ kartotinis. Vadinasi, turi būti tenkinama sąlyga

$$mvr = n \cdot \frac{h}{2\pi}; \qquad (10.6)$$

čia h – Planko konstanta, n – sveikasis skaičius, kuris atomo fizikoje vadinamas pagrindiniù kvántiniu[1] skaĩčiumi. Būtent šis skaičius leidžia nusakyti vandenilio atomo būsenos energiją, kuri kinta diskretiškai. Taigi atomo energija yra kvantuota. Atomo būsena, atitinkanti mažiausią energiją E_1 ($n = 1$), vadinama pagrindine.

Iš 10.4 lygties išreikškime elektrono greitį ir jo vertę įrašykime į 10.6 lygtį. Gausime galimų elektrono orbitų spindulių išraišką:

$$r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2 n^2}{\pi m e^2}. \qquad (10.7)$$

Matome, kad, keičiantis pagrindiniam kvantiniam skaičiui n, elektrono orbitų spindulių ilgis kinta diskretiškai. Pagal 10.7 formulę apskaičiavus vandenilio atomo mažiausios elektrono orbitos spindulio ilgį, gaunama vertė $5 \cdot 10^{-11}$ m. Būtent toks ir yra atomo spindulio ilgis. Taigi Boro teorija jo vertę nusakė tiksliai.

[1] Atomo ir branduolio fizikoje vartojami ir kiti kvantiniai skaičiai: l – elektròno orbìtinis kvántinis skaĩčius, m – magnètinis kvántinis skaĩčius. Plačiau apie juos sužinosite studijuodami fiziką universitetuose.

Įrašę 10.7 išraišką į 10.5 formulę, galime sužinoti vandenilio atomo nuostoviųjų būsenų energijų vertes:

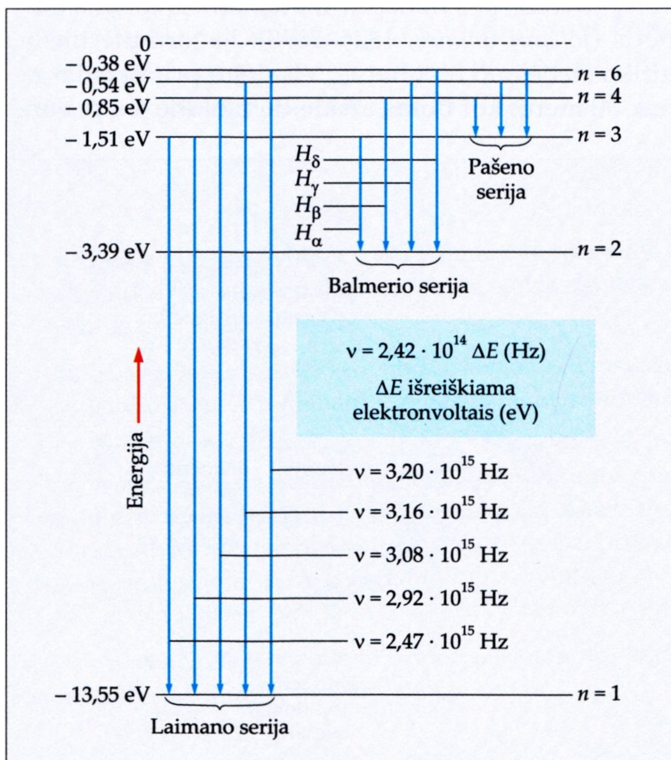
$$E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2}. \qquad (10.8)$$

Kai vandenilio atomas yra žemiausios, pagrindinės, energinės būsenos, t. y. kai $n = 1$, pagal 10.8 formulę $E_1 = -13{,}55$ eV. Toks atomas gali būti labai ilgai. Norint jį jonizuoti (išlaisvinti elektroną), reikia jam suteikti 13,55 eV energijos. Atomo būsenos, atitinkančios $n = 2, 3, 4, 5, ...$, yra sužadintosios. Sužadintas atomas būna ne ilgiau kaip 10^{-7} s. Norint aiškiau įsivaizduoti vandenilio atomo būsenas, braižoma energinių būsenų diagrama (žr. 10.1.5 ir 10.2.3 pav.).

Nustatę vandenilio atomo nuostoviųjų būsenų energijos vertes E_n, galime apskaičiuoti šio atomo skleidžiamos spinduliuotės dažnius. Remkimės antruoju Boro postulatu ir 10.1 formule:

$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h}; \qquad (10.9)$$

čia E_m ir E_n – dvi atomo energinės būsenos. Į 10.9 formulę įrašykime 10.8 išraišką, atsižvelgdami į ati-



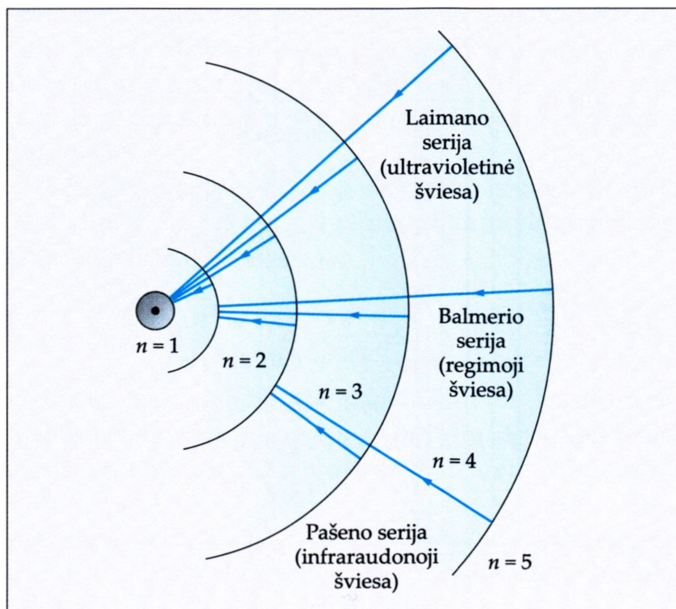
10.2.3 pav.

tinkamas atomo nuostoviųjų energinių būsenų vertes. Gausime:

$$\nu = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right); \qquad (10.10)$$

čia $R = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}$ – dydis, vadinamas Rydbergo konstanta. Jos vertė yra apytiksliai $3{,}29 \cdot 10^{15}\ s^{-1}$. Pasinaudoję sąsaja $\lambda = \frac{c}{\nu}$ ir 10.10 formule, galime sužinoti atomo spinduliuotės spektro linijų bangų ilgius. Iš 10.10 formulės matyti, kad vandenilio atomo skleidžiamos spinduliuotės visos spektro linijos, atitinkančios tą pačią n reikšmę, tačiau skirtingas m reikšmes, sudaro grupę, arba seriją. Vienai serijai priskiriami spinduliuotės, kurią atomas skleidžia peršokdamas iš aukštesnių energijos lygmenų į vieną žemesnį lygmenį, dažniai. Pavyzdžiui, visi galimi atomo šuoliai iš aukštesnių leidžiamosios energijos lygmenų į antrąjį lygmenį (n = 2) sudaro vadinamąją Balmerio seriją, apimančią regimosios šviesos sritį. Šią seriją 1885 m. pirmą kartą stebėjo ir apibūdino matematine formule (10.10) Šveicārijos fizikas ir matematikas Johanas Balmeris (*Johann Balmer*, 1825–1898). Jo formulė tiksliai atitiko stebėjimo rezultatus. Vis dėlto prireikė dar beveik 30 metų, kol Boras atskleidė fizikinę jos prasmę.

10.2.4 pav.



10.2.3 paveiksle pavaizduota vandenilio atomo energijos lygmenų schema (horizontaliosios linijos). Vertikaliosios linijos žymi galimus atomo šuolius ir spektrinių serijų susidarymo principą. 10.2.4 paveiksle – vandenilio atomo orbitos ir trijų spektrinių serijų linijos. Vandenilio atomo šuoliai iš aukštesnių leidžiamosios energijos lygmenų į pirmąjį (pagrindinį) lygmenį ($n = 1$) sudaro atomo spinduliuotės ultravioletinių spektro linijų seriją, vadinamą Laimano serija. Jeigu atomas peršoka iš bet kurio galimo aukštesnio lygmens į trečiąjį lygmenį ($n = 3$), jis išspinduliuoja infraraudonųjų spindulių seriją. Ji vadinama Pašeno serija. Vandenilio skleidžiamos spinduliuotės infraraudonojoje spektro srityje atrastos dar trys serijos: Breketo ($n = 4$), Pfundo ($n = 5$) ir Hemfrio ($n = 6$).

Boro darbai iš esmės pakeitė tų laikų supratimą apie atomą. Remdamasis pusiau klasikiniu ir pusiau kvantiniu modeliu, Boras sugebėjo paaiškinti vandenilio atomo skleidžiamos spinduliuotės spektrą. Tačiau jo teorija susidūrė su sunkumais, aiškindama sudėtingesnių atomų (helio ir kt.) spinduliuotės spektrus. Vėliau, sukūrus naujas kvantinės mechanikos ir kvantinės elektrodinamikos teorijas, atsirado galimybė tiksliai apibūdinti ir sudėtingesnių atomų sandarą. Už atomo teorijos sukūrimą Nilsui Borui 1922 m. buvo paskirta Nobelio premija.

Klausimai ir užduotys ??

1. Kokia yra vandenilio atomo Balmerio serijos ribinio dažnio (kai $m \to \infty$) prasmė? Ar iš tikrųjų egzistuoja ribinio dažnio spektro linija?

2. Išvardykite visas spektro linijas, kurios gali atsirasti, vandenilio atomui pereinant į tokias energines būsenas:
a) $n = 1$; b) $n = 3$; c) $n = 5$.

3. Apskaičiuokite vandenilio atomo skleidžiamos spinduliuotės bangos ilgį, kai elektronas peršoka iš ketvirtojo energijos lygmens į antrąjį. Kuriai spektro sričiai priklauso ši spinduliuotė? Kam lygi išspinduliuoto fotono energija? (485 nm; $4{,}08 \cdot 10^{-19}$ J)

4. Apskaičiuokite vandenilio atomo elektrono, skriejančio trečiąja orbita, linijinio greičio modulį. (728 km/s)

5. Kokio dažnio fotonas turi paveikti vandenilio atomą, kad jis peršoktų iš pagrindinės energinės būsenos į ketvirtąją sužadintąją energinę būseną? Ar toks fotonas yra matomas?

6. Koks gali būti didžiausias fotono bangos ilgis, kad tas fotonas gebėtų jonizuoti pagrindinės būsenos vandenilio atomą?

(92 nm)

7. Bangų ilgių skalėje pažymėkite po keturias vandenilio atomo pirmųjų trijų spektrinių serijų linijas.

8. Koks bus didžiausias vandenilio atomo skleidžiamos spinduliuotės bangos ilgis, kai atomas pereis į pagrindinę energinę būseną? Kokia tai bus spinduliuotės spektro linijų serija?

Pagrindinės sąvokos

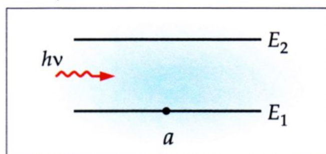
Savàiminis spinduliãvimas,
priverstìnis spinduliãvimas,
òptinis kvántinis generãtorius,
lãzeris,
aktyvióji tèrpė,
enèrgijos lygmenų̃ ùžpildos apgrąžà,
kaũpinimas,
holográfija,
hologramà.

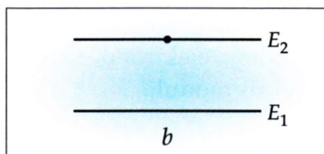
10.3. Lazeriai

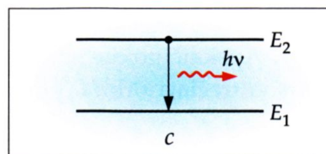
Priverstinis spinduliavimas

Atomą, esantį energijos lygmenyje E_1, gali sužadinti, t. y. perkelti į lygmenį E_2, fotonas, kurio energija $E_2 - E_1 = h\nu$ (10.3.1 pav., *a* ir *b*). Tačiau atomas sužadintas būna neilgai. Netrukus jo elektronas savaime peršoka iš aukštesnio energijos lygmens į žemesnį. Toks elektrono šuolis vadinamas saváiminiu. Peršokant elektronui, atomas bet kuria kryptimi išspinduliuoja energijos $E_2 - E_1 = h\nu$ kvantą (10.3.1 pav., *c*). ***Saváiminis spinduliãvimas*** yra atsitiktinis. Numatyti, kada elektronas peršoks iš vieno lygmens į kitą, neįmanoma. Dėl to įvairūs atomai spinduliuoja skirtingu laiko momentu. Tokiõs atomų spinduliuotės bangų fazės, poliarizacija ir sklidimo kryptys nesutampa. Vadinasi, savaiminis spinduliavimas yra nekoherentinis.

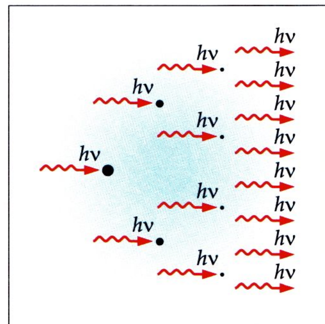
10.3.1 pav.







1917 m. Albertas Einšteinas atkreipė dėmesį į tai, kad sužadintą atomą galima priversti spinduliuoti šviesą anksčiau, nei prasidės savaiminis spinduliavimas. Jeigu sužadintą energinės būsenos E_2 atomą paveiktų fotonas, kurio energija lygi elektrono šuolio į žemesnį lygmenį E_1 energijai ($E_2 - E_1 = h\nu$), tai atomas išspinduliuotų fotoną, kuris būtų toks pat, kaip ir tas, kuris jį sukūrė. Šių fotonų sutaptų ne tik energija, bet ir fazė, poliarizacija bei sklidimo kryptis. Taigi galėtume sakyti, kad ***priverstìnis spinduliãvimas*** ir jį sužadinęs spinduliavimas yra koherentiniai (žr. 8.4 temą). Dėl to pirminis šviesos signalas būtų stiprinamas.



10.3.2 pav.

Tačiau reikia priminti, kad medžiaga tuo pačiu metu ne tik skleidžia, bet ir sugeria šviesą. Kai atomas, pereidamas iš energinės būsenos E_1 į energinę būseną E_2 (10.3.1 pav., *a* ir *b*), sugeria fotoną, šis išnyksta. Sumažėjus fotonų skaičiui, sumažėja ir šviesos, sklindančios sužadinta medžiaga, intensyvumas. Vadinasi, medžiagoje vienu metu vyksta du vienas kitam priešingi procesai: priverstinis spinduliavimas ir fotonų sugėrimas. Jeigu dažnesnis yra priverstinis spinduliavimas, tai medžiaga šviesą stiprina. Fotonas, privertęs elektroną peršokti iš aukštesnio energijos lygmens į žemesnį, sukuria medžiagoje tokį pat naują fotoną. Atsiradę du fotonai, sąveikaudami su kitais dviem sužadintais atomais, perkelia juos iš aukštesnio energijos lygmens E_2 į žemesnį lygmenį E_1. Toliau medžiaga jau skrieja keturi vienodi fotonai ir t. t. (10.3.2 pav.). Kyla fotonų griūtis. Kiekvieno tokio proceso metu medžiaga sklindančios šviesos intensyvumas didėja. Čia ir yra esminė priverstinio spinduliavimo savybė, dėl kurios šis reiškinys yra įdomus ir naudingas kuriant intensyvius koherentinius šviesos pluoštus. Tačiau nežinia kodėl pasaulio šalių fizikai taip ilgai neskubėjo šio reiškinio savybių taikyti praktikoje.

Sąlygos, reikalingos lazeriui sukurti

Vis dėlto, praėjus 37 metams po Alberto Einšteino teorinių įžvalgų pateikimo, priverstinis spinduliavimas buvo pritaikytas įrenginyje, kuris vadinamas ***kvántiniu generãtoriumi***. Jame atomo priverstiniai

spinduliniai šuoliai kuria tam tikro dažnio elektromagnetinę spinduliuotę. Jeigu ji yra regimoji, įrenginys vadinamas ***òptiniu kvántiniu generãtoriumi***, arba ***lãzeriu***[1].

1954 m. amerikietis Čarlzas Taunsas (*Charles Townes*, g. 1915) su bendradarbiais ir rusų fizikai Nikolajus Basovas (1922–2001) ir Aleksandras Prochorovas (1916–2002) beveik tuo pačiu metu ir nepriklausomai vieni nuo kitų sukūrė pirmąjį centimetrinių radijo bangų, t. y. mikrobangų (λ = 1,24 cm), kvantinį generatorių – mãzerį[2]. O 1960 m. JAV mokslininkas Teodoras Maimanas (*Theodor Maiman*, 1927–2007) Hjuzo laboratorijoje pagamino pirmąjį regimojo spektro optinį kvantinį generatorių – lazerį.

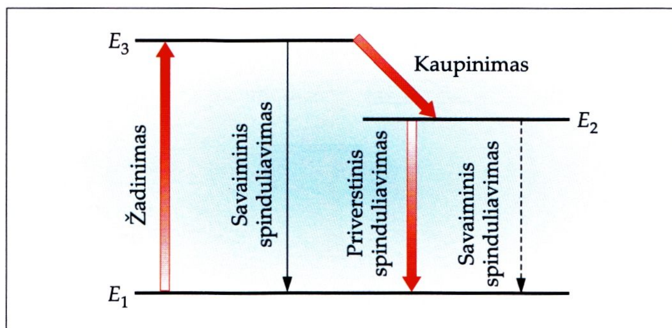
Panagrinėkime sąlygas, kurių reikia lazeriui sukurti. Kai sistema yra termodinamiškai pusiausvira, aukštesniame energijos lygmenyje E_2 atomų yra mažiau negu žemesniame lygmenyje E_1. Fotonų srautui sklindant tokia medžiaga (ji vadinama aktyviąja térpe, arba òptiniu rezonãtoriumi), dažnesni yra sugerties šuoliai negu priverstiniai spinduliuojamieji šuoliai. Tai lemia didesnė tikimybė, kad fotonai sąveikaus su energinės būsenos E_1 atomais (jų yra daugiau) nei su būsenos E_2 atomais. Todėl tokia medžiaga sklindančios šviesos intensyvumas mažėja. Norint jį padidinti, reikia medžiagoje sukurti atomų ***enèrgijos lygmenų̃ ùžpildos ãpgrąžą***, t. y. tokią medžiagos būseną, kai aukštesnio energijos lygmens E_2 užpilda yra didesnė nei pagrindinio lygmens E_1. Atomų energijos lygmenų apgrąžinės užpildos sudarymas vadinamas ***kaũpinimu***. Be to, reikia atkreipti dėmesį į tai, kad, naudojant tik du atomo energijos lygmenis, lazerio sukurti nepavyks, nes bus sunku sudaryti nepusiausvirąją sistemos būseną. Atomų šuoliai ($E_2 \rightarrow E_1$) visų pirma bus savaiminiai.

Trilygmenė schema

Iš tiesų kaupinama pagal trilygmenę schemą (10.3.3 pav.). E_1 yra nesužadinto atomo pagrindinis energijos lygmuo, E_2 ir E_3 – sužadinto atomo energijos lygmenys. Neveikiama iš išorės sistema skirtinguose energijos lygmenyse išbūna nevienodą laiko tarpą (sakome, kad jos gyvãvimo trukmẽ yra skirtinga). Lygmenyje E_3 ji būna labai trumpai, vos 10^{-8} s, o lyg-

[1] Lazeris – anglų kalbos frazės ***L****ight* ***A****mplification by* ***S****timulated* ***E****mission of* ***R****adiation*, kuri reiškia šviesos stiprinimą priverstiniu spinduliavimu, santrumpa.

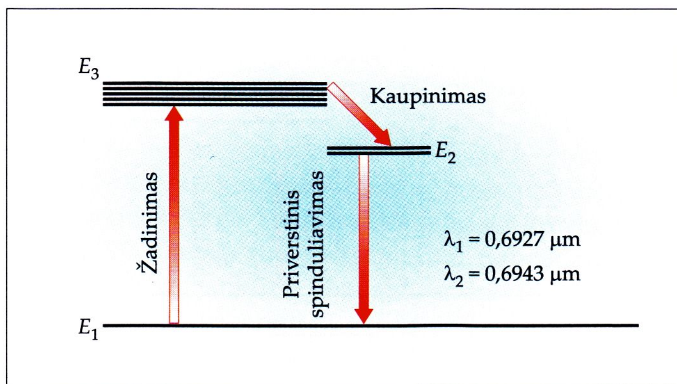
[2] Jeigu kvantinio generatoriaus kuriama elektromagnetinė spinduliuotė yra mikrobangų srityje, generatorius vadinamas mazeriu (žodžio „lazeris“ raidė l pakeičiama raide m).



10.3.3 pav.

menyje E_2, kuris yra beveik pastovus (dėl to vadinamas kvazinuostoviúoju enèrgijos lýgmeniu) – gerokai ilgiau, maždaug 10^{-3} s (t. y. 100 000 kartų ilgiau negu lygmenyje E_3). Tokią trilygmenę sistemą veikiant intensyviu fotonų srautu, kurio dažnis $\nu = \frac{E_3 - E_1}{h}$, vyrauja sugerties šuoliai iš energijos lygmens E_1 į lygmenį E_3. Paskui dalis sužadintų atomų savaime spinduliuodami grįžta iš lygmens E_3 į lygmenį E_1, o dalis leidžiamuoju nespinduliuojamuoju šuoliu pereina į tarpinį lygmenį E_2. Šuolio $E_3 \rightarrow E_2$ metu išsiskyrusi energija perduodama medžiagos kristalinei gardelei. Lygmuo E_2 yra arti lygmens E_3, todėl tikimybė, kad sužadinti atomai, atidavę gretimiems atomams energijos kiekį $\Delta E = E_3 - E_2$, nespinduliuodami pereis į kvazinuostovųjį energijos lygmenį E_2, yra labai didelė. Kadangi savaiminio šuolio iš lygmens E_2 į pagrindinį lygmenį E_1 tikimybė yra labai maža, tai lygmenyje E_2 susikaupia daugiau sužadintų atomų, negu jų yra pagrindiniame lygmenyje E_1. Taigi vyksta kaupinimas (sudaroma energijos lygmenų E_1 ir E_2 užpildos apgrąža). Dėl to atsiranda palankios sąlygos priverstiniam spinduliavimui. Šio proceso metu turi būti sužadinta daugiau kaip pusė visų medžiagos atomų.

Sakykime, kad dažnio $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ fotonas, kurį atomas išspinduliuoja peršokdamas iš energijos lygmens E_2 į lygmenį E_1, gali sužadinti spinduliuojamąjį šuolį $E_2 \rightarrow E_1$. Taip atsiranda dar vienas toks pat fotonas. Abu jie gali sukelti naujus spinduliuojamuosius šuolius. Medžiagoje prasideda spinduliuojamųjų šuolių griūtis, kuri stiprina dažnio ν_1 signalą. Tuo pagrįstas lazerio veikimas.



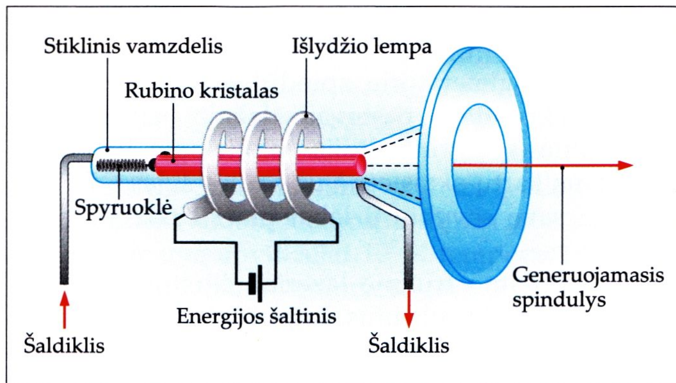
10.3.4 pav.

Rubino lazerio konstrukcija

Teodoro Maimano sukurto pirmojo lazerio, veikiančio pagal trilygmenę schemą, aktyvioji terpė buvo rubino kristalas. Rubinas yra skaisčiai raudonas aliuminio oksido (Al_2O_3) kristalas, turintis 0,05 % chromo atomų priemaišų. Aktyvioji lazerio terpė, kurioje vyksta priverstiniai šuoliai, yra chromo atomai. 10.3.4 paveiksle pavaizduota supaprastinta chromo atomo lygmenų schema rubino lazeryje. Šioje schemoje energijos lygmuo E_1 yra pagrindinis, energijos juosta E_3 sudaryta iš keleto artimų sužadintų chromo atomų energijos lygmenų, E_2 – dvigubas kvazinuostovusis lygmuo.

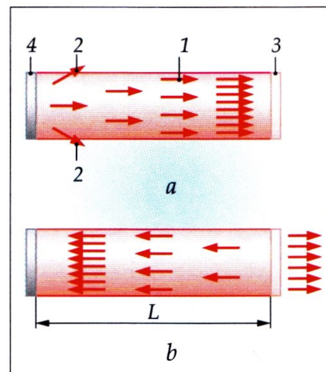
Rubino kristalą efektyviai žadina spiralės formos impulsinė išlydžio lempa, pripildyta neono ir kriptono dujų mišinio. Ji skleidžia intensyvią žalią šviesą. Sugėrę fotoną, sužadinti chromo atomai peršoka į energijos juostos E_3 lygmenis. Labiausiai tikėtina, kad iš čia jie pereis į kvazinuostovųjį energijos lygmenį E_2. Nespinduliuojamojo šuolio ($E_3 \rightarrow E_2$) metu išsiskyrusi energija perduodama rubino kristalo gardelei. Kadangi chromo atomų savaiminių šuolių iš lygmens E_2 į lygmenį E_1 tikimybė yra labai maža, sudaroma chromo atomų energijos lygmenų E_1 ir E_2 užpildos apgrąža, reikalinga lazerio spinduliuotei.

Iš rubino kristalo pagaminamas ritinio formos strypas (optinis rezonatorius) plokščiais lygiagrečiais galais. Jis įtaisomas spiralinės išlydžio lempos viduje (10.3.5 pav.). Impulsinės dujų išlydžio lempos šviesa žadina chromo atomus ir sukuria jų energijos lygmenų E_1 ir E_2 užpildos apgrąžą. Dėl atomo savaiminio šuolio $E_2 \rightarrow E_1$ atsiradęs fotonas sukelia tokius



10.3.5 pav.

pat priverstinius šuolius. Taip rubino kristalo strypu įvairiomis kryptimis ima sklisti daugybė vienodų fotonų (10.3.6 pav.). Tie, kurie juda ne išilgai ritinio ašies (*2* spinduliai 10.3.6 pav., *a*), išeina iš jo pro šoninį paviršių nesuformavę stipresnio spindulio. Kiti, sklindantys lygiagrečiai su ritinio ašimi (*1* spinduliai 10.3.6 pav., *a*), sukelia stiprų priverstinį spinduliavimą ir tokių pat sužadintų fotonų griūtį, nes kristalu nueina ilgesnį kelią (*L*). Kad šis efektas būtų stipresnis, vienas strypo galas (*4*) pasidabruojamas, o kitas (*3*) padaromas pusiau skaidrus.



10.3.6 pav.

Atsispindėję nuo strypo pasidabruoto (veidrodinio) galo, fotonai daug kartų pralekia išilgai ritinio ir pakeliui sukuria vis naujų fotonų. Dalis jų srauto pasiekia pusiau skaidrų ritinio galą ir pro jį išeina išorėn – raudonos spalvos lazerio spindulio pavidalu. Kita fotonų dalis atsispindi ir, toliau sklisdama aktyviąja lazerio terpe, sukelia tokių pat fotonų griūtį. Procesą palaiko šviesos šaltinis, kuris nenutrūkstamai kaupina rubino lazerį. Taip pagamintas rubino optinis generatorius skleidžia ilgių $\lambda_1 = 0{,}6927$ μm ir $\lambda_2 = 0{,}6943$ μm bangas.

Šiandien mokslininkai žino daugybę medžiagų, kurioms būdingos lazerio savybės. Lazerio aktyvioji terpė gali būti ne tik kristalai, bet ir dujos, skysčiai, organiniai dažai, puslaidininkiai arba plazma. Tačiau visų lazerių pagrindinis veikimo principas yra tas pats – sudaryti atomų (molekulių) energijos lygmenų užpildos apgrąžą. Skiriasi tik aktyviosios terpės sužadinimo būdai ir naudojamų lygmenų schema priverstiniam spinduliavimui gauti.

Lazerių rūšys ir taikymas

Kvantinių generatorių spinduliuotė yra koherentinė, labai kryptinga, pastovaus dažnio, beveik monochromatinė (spektrinės linijos plotis apie 10^{-11} m) ir milijardus kartų skaistesnė už saulės šviesą. Dėl šių unikalių savo savybių ji labai plačiai taikoma įvairiose srityse.

Pagal veikimo trukmę lazeriai skirstomi į nuolatinės veikos ir impulsinius. Impulsiniai lazeriai skleidžia vienkartinius arba periodinius elektromagnetinės spinduliuotės impulsus, kurių trukmė yra keletas femtosekundžių (1 fs = 10^{-15} s) arba atosekundžių (1 as = 10^{-18} s). Pagal aktyviąją terpę lazeriai skirstomi į dujų, kietojo kūno, skysčio, puslaidininkinius ir kitokius lazerius, o pagal skleidžiamos spinduliuotės dažnį (arba bangos ilgį) – į infraraudonosios, ultravioletinės, rentgeno spinduliuotės ir regimosios šviesos lazerius. Lazerių spinduliuotės galia gali būti labai įvairi – nuo vato dalių iki 10^{14} W/cm^2 (trumpalaikė) siauroje spinduliuotės spektro srityje. Be to, lazerio spinduliuotė sutelkta kryptingame ir siaurame spindulyje. Jį sudarančio šviesos pluošto skėsties kampas yra 10^{-5}–10^{-6} rad.

Kiekviena paminėta lazerio spinduliuotės savybė plačiai taikoma fundamentiniuose tyrimuose, technikoje ir medicinoje. Šiandien sunku išvardyti visas lazerių taikymo sritis, o dar sunkiau numatyti, kur jie bus naudojami artimiausioje ateityje. Aptarsime tik keletą tokių sričių.

Pritaikius koherentiškumo savybę, sukurti lazeriniai interferomètrai, kuriais galima matuoti mažus poslinkius ir nuotolius. Šie prietaisai naudojami tikslių metalo apdirbimo staklių ir koordinatinių matavimo prietaisų atskaitos sistemose. Koherentinė ir labai kryptinga lazerio spinduliuotė naudojama ryšių technikoje. Pavyzdžiui, šia spinduliuote, kurios bangos ilgis 10^{-6} m, o juostos plotis 0,1 nm, galima perduoti net 10 000 radijo programų. Šiuolaikiniais lazeriais ryšį galima palaikyti milžiniškais atstumais. Mažos galios siauras lazerio spinduliuotės pluoštas naudojamas įvairių prekių brūkšninių kodų skaitymo, kompaktinių diskų įrašymo ir skaitymo įrenginiuose.

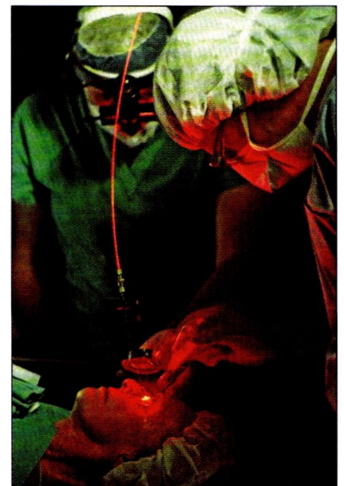
Kryptingą monochromatinę lazerio spinduliuotę sutelkę į keleto mikrometrų skersmens plotelį, jame

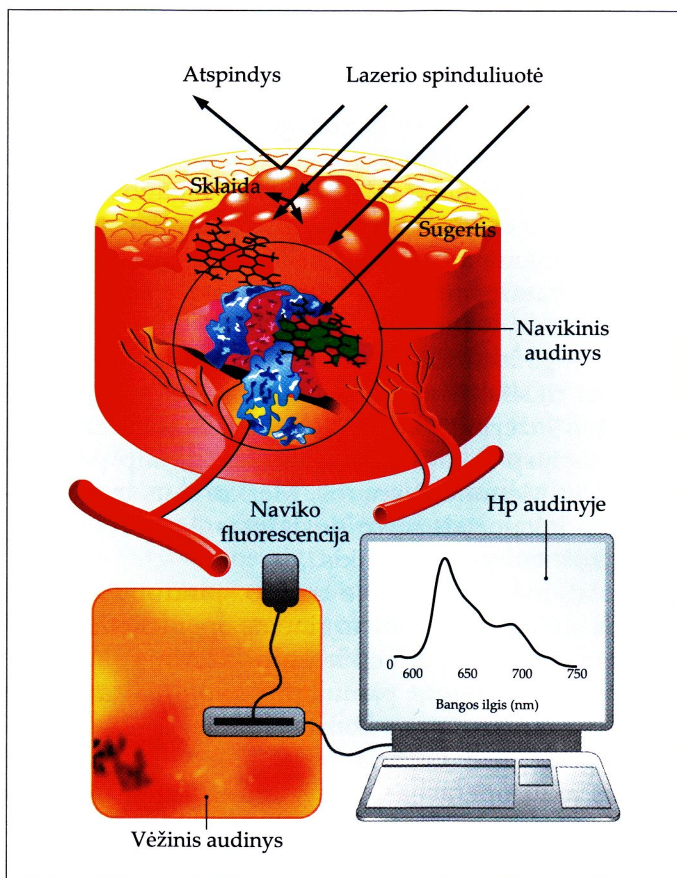
esančią medžiagą galėtume įkaitinti iki milijono kelvinų ir išgarinti. Taigi lazerio spinduliuote galima lydyti, garinti, pjaustyti ir gręžti įvairias medžiagas, pramušti labai kietose medžiagose (pavyzdžiui, deimante) siaurutes kiaurymes (iki 100 µm), suvirinti mikrodaleles. Sutelkta labai didelės galios lazerio spinduliuote veikiant kietuosius kūnus arba suslėgtas dujas, gaunama apytiksliai 10^7 K temperatūros plazma, kuri naudojama valdomose termobranduolinėse reakcijose.

Kryptinga lazerio spinduliuotė naudojama, kai reikia labai tiksliai išmatuoti atstumus. Taip veikia vadinamieji lazeriniai lokatoriai, kuriais atstumas matuojamas tarp Žemės paviršiaus taškų, taip pat nuo Žemės iki Mėnulio, Veneros, Merkurijaus ir t. t. Lazeriniais lokatoriais buvo nustatytas Afrikos ir Pietų Amèrikos žemynų poslinkis.

Šiuolaikinėje medicinoje lazerio spinduliuotė naudojama sudėtingoms chirurginėms operacijoms atlikti. Ji yra sterili, todėl veikia kaip lazerinis skalpelis. Lazerio spinduliuote pjaunami biologiniai audiniai kraujuoja mažiau, nes pažeistas kraujagysles spinduliuotė pridegina. Lazeriai ypač efektyvūs atliekant įvairias akių operacijas, pavyzdžiui, atšokusią akies tinklainę pritvirtinant prie akies dugno audinių (10.3.7 pav.). Jie taip pat naudojami pigmentinėms odos dėmėms balinti. Tamsios pigmentinės dėmės stipriau sugeria impulsais skleidžiamą lazerio spinduliuotę, todėl odos ląstelėse esantys melanino grūdeliai lengvai sunaikinami. Kita lazerių taikymo medicinoje sritis – piktybinių navikų paieška. Veikiama lazerio spinduliuotės, kiekviena žmogaus kūno ląstelė ima švytėti (šis procesas vadinamas fluoresceñcija). Pagal sveikų ir pažeistų ląstelių savitą švytėjimą galima aptikti navikus (10.3.8 pav.). Lazerio spinduliuote piktybiniai navikai ne tik aptinkami, bet ir gydomi. Vienas iš jų gydymo metodų yra fotodinãminė terãpija. Ji pagrįsta tam tikrų šviesai jautrių medžiagų (fotosensibilizãtorių) savybe kauptis navikiniuose audiniuose. Ligoniui į veną suleidžiama fotosensibilizatoriaus, kuris po tam tikro laiko susikaupia vėžio pažeistose ląstelėse. Paskui navikas apšviečiamas reikiamo bangos ilgio lazerio spinduliuote. Audinyje prasideda fotocheminės reakcijos, per kurias navikinės ląstelės žūsta. Gretimi sveiki audiniai pažeidžiami mažai.

10.3.7 pav.





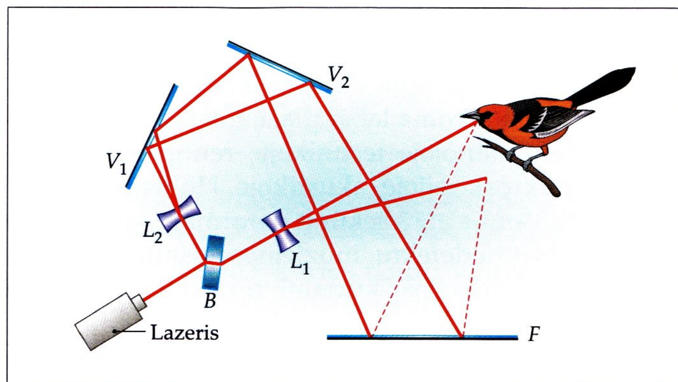
10.3.8 pav.

Dar viena svarbi lazerių taikymo sritis yra lazerìnė spektroskòpija. Naudojant lazerio spinduliuotę, spektroskopiniais metodais tiriamos įvairių medžiagų savybės, pavyzdžiui, vandens paviršiuje per atstumą ieškoma teršalų ir jie identifikuojami (benzinas, mazutas ar pan.). Lazerio spinduliuote galima valdyti chemines reakcijas.

Denisas Gaboras



Sukūrus lazerį, atsirado nauja taikomosios fizikos sritis – ***holografija*** (gr. *holos* – visas, *graphō* – rašau). Tai objekto erdvinio (trimačio) atvaizdo įrašymo ir atkūrimo metodas, grindžiamas koherentinių bangų interferencija. Šiuo būdu gautas atvaizdas vadinamas ***hologramà***. Ji yra visiškai kitokia nei įprasta fotografija, kuri gaunama įrašant fotoplėvelėje arba fotoplokštelėje tik objekto vaizdo projekciją plokštumoje. Plokščiosios hologramos gavimo principus 1948 m. pirmą kartą aprašė vengrų kilmės anglų fizikas Denisas Gaboras (*Dennis Gabor*, 1900–1979). Už hologra-

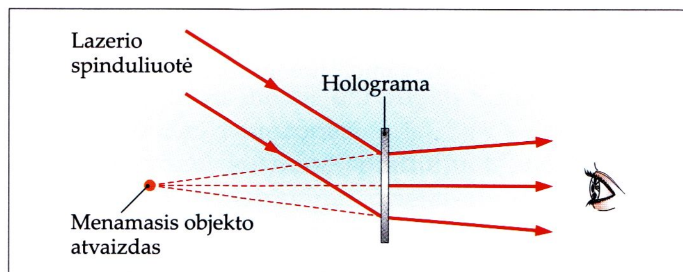


10.3.9 pav.

fijos išradimą 1971 m. jam paskirta Nobelio premija. Sukūrus lazerį, holografija labai ištobulėjo ir dabar vadinama lazerinè holografija.

Išsiaiškinkime, kaip gaunama objekto holograma. Lazerio spinduliuotės pluoštas pusiau skaidriu veidrodžiu B padalijamas į du pluoštus (10.3.9 pav.). Vienas iš jų lęšiu L_1 nukreipiamas į objektą. Atsispindėjęs nuo įvairių objekto paviršiaus taškų, šis pluoštas krinta į fotoplokštelę F. Kitas pluoštas, atsispindėjęs nuo pusiau skaidraus veidrodžio B, pereina lęšį L_2 ir veidrodžiais V_1 ir V_2 nukreipiamas į tą pačią fotoplokštelę. Abiejų pluoštų spinduliuotė yra vienoda (bangos koherentinės), todėl fotoplokštelėje susidaro interferencinis vaizdas. Išryškinus fotoplokštelę, gaunama holograma, kurioje galima matyti sudėtingą interferencinį vaizdą, t. y. užšifruotą objekto atvaizdą.

Norint atkurti šį atvaizdą, reikia hologramą apšviesti tokia pat lazerio spinduliuote, kokia buvo naudota įrašant. Interferencinis vaizdas šį spinduliuotės pluoštą išsklaido (10.3.10 pav.) ir kartu atkuria spinduliuotę, atėjusią nuo objekto į hologramą įrašymo metu. Atkurta spinduliuotė ir sudaro erdvinį objekto atvaizdą. Uždengę dalį hologramos, vis tiek matome



10.3.10 pav.

visą objekto atvaizdą, tačiau jis nėra labai ryškus. Taip yra dėl to, kad kiekviename hologramos taške įrašyta informacija apie visą objektą.

Holografija taikoma labai plačiai: taikomojoje optikoje, infraraudonojoje technikoje, rentgeno ir elektroninėje mikroskopijoje, akustikoje. Holografijos metodu matuojamos mažos kūnų deformacijos, ieškoma smulkių objektų defektų, muziejuose gaminamos eksponatų reprodukcijos, kuriami reklaminiai optiniai atvaizdai.

Klausimai ir užduotys ??

1. Kuo lazerio spinduliuotė skiriasi nuo įprastinės šviesos?

2. Ką vadiname atomo priverstiniu spinduliavimu?

3. Paaiškinkite atomo energijos lygmenų užpildos apgrąžą.

4. Kodėl fizikai stengiasi sukurti lazerį, kuris skleistų kuo didesnio dažnio spinduliuotę?

5. Rubino lazerio veikimas pagrįstas chromo jonų trilygmene schema (žr. 10.3.4 pav.). Paaiškinkite tokio kvantinio generatoriaus veikimą.

6. Paaiškinkite objekto hologramos (erdvinio atvaizdo) gavimo fizikinius principus.

7. Impulsiniam lazeriui reikia 10^3 W galios. Per 1 s jis pasiunčia 200 impulsų, kurių kiekvieno trukmė 5 μs. Apskaičiuokite vieno impulso spinduliuotės energiją ir galią. Spinduliuotei sunaudojama 0,1 % galios.

(0,005 J; 10^3 W)

8. Nuolatinės veikos He-Ne dujų lazeris skleidžia monochromatinę spinduliuotę ($\lambda = 630$ nm). Lazerio galia 0,04 W. Kiek fotonų šis lazeris išspinduliuoja per 1 s?

($1{,}3 \cdot 10^{17}$)

9. Parenkite referatus „Lazerių rūšys", „Lazerių taikymo sritys" ir „Vaizduojamoji holografija".

10.4. Elementariosios dalelės

Elementariosios dalelės samprata

Pirminės dalelės, kurios neturi vidinės struktūros, vadinamos ***elementariõsiomis dalẽlėmis***. Iš jų sudaryta visa materija. Dalelių elementarumo supratimas ilgainiui kito. Demokrito laikais nedaloma dalele buvo laikomas atomas. Vėliau Rezerfordo bandymai ir radioaktyvumo atradimas parodė, kad atomas nėra nedalomas. Jis sudarytas iš elektronų, protonų ir neutronų. Dalelės, iš kurių sudaryti atomai, vadinamos ***subatòminėmis dalẽlėmis***. Kurį laiką manyta, kad šios dalelės yra nekintamos, todėl jos vadintos elementariosiomis. Vėliau paaiškėjo, kad protonas ir neutronas nėra stabilūs. Laisvasis neutronas savaime skyla į protoną, elektroną ir antineutriną.

Pradėjus plačiai tirti kosminę spinduliuotę, buvo surastos naujos elementariosios dalelės. Taip 1932 m. JAV fizikas Karlas Andersonas (*Carl Anderson*, 1905–1991), Vilsono kameroje stebėdamas kosminės spinduliuotės dalelių pėdsakus, aptiko iki tol nežinomą dalelę. Jos masė ir elektros krūvis buvo kaip elektrono, tačiau krūvio ženklas – teigiamas. Šią dalelę Andersonas pavadino pozitronù (teigiamuoju elektronu). 1936 m. už pozitrono atradimą Andersonui paskirta Nobelio premija.

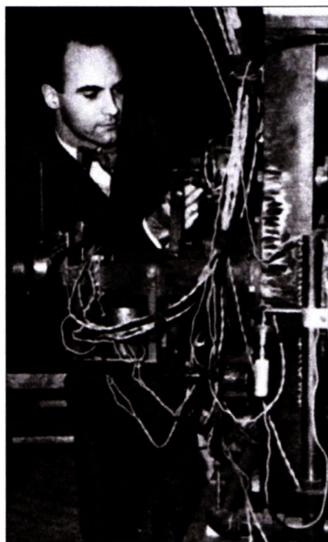
1936 m. aptikta dar viena dalelė, panaši į elektroną, tačiau jos masė buvo 207 kartus didesnė. Ši nestabili dalelė (jos gyvavimo trukmė – apie 10^{-6} s) buvo pavadinta mezonù (gr. *mesos* – vidutinis, vidurinis, tarpinis), o vėliau pavadinimas pakeistas į miuòną. 1947 m. anglų fizikas Sesilis Pauelas (*Cecil Powell*) su bendradarbiais aptiko net kelis elektringuosius mezonus, kurie dabar vadinami pi mezònais (π^+, π^-). Už šiuos darbus 1950 m. Pauelui paskirta Nobelio premija. Tais pačiais metais dar atrasti K mezònai, o kiek vėliau aptiktas τ mezònas.

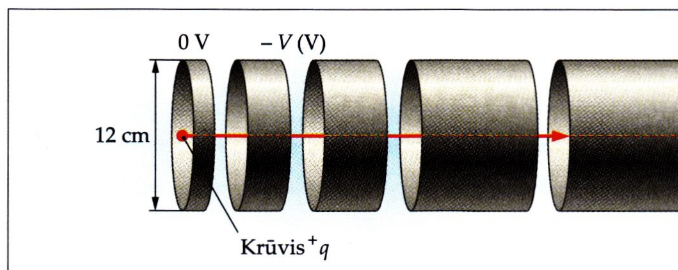
Toliau tiriant kosminę spinduliuotę, naujų dalelių aptikimas jų registravimo prietaisais darėsi neefektyvus. Norint geriau suprasti elementariųjų dalelių prigimtį, reikėjo dalelių, kurių energija būtų didesnė.

Pagrindinės sąvokos

Elementarióji dalẽlė,
subatòminė dalẽlė,
antidalẽlė,
antimẽdžiaga,
gravitãcinė są́veika,
elektromagnètinė są́veika,
stiprióji są́veika,
silpnóji są́veika.

Karlas Andersonas



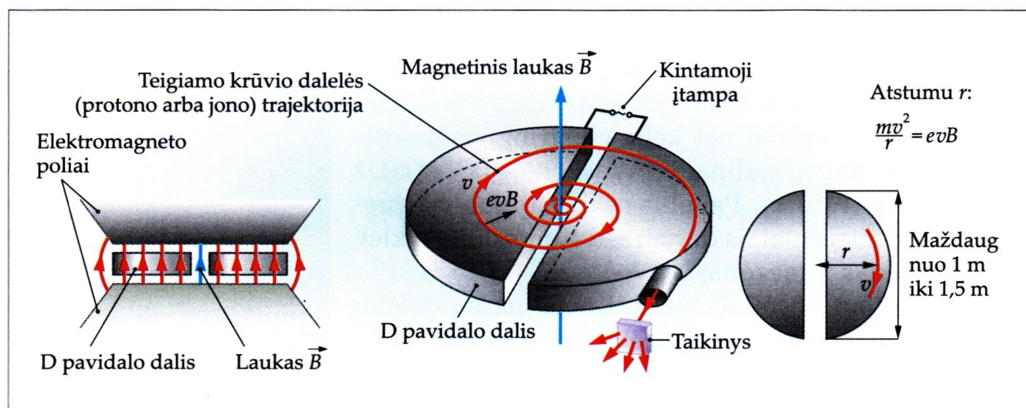


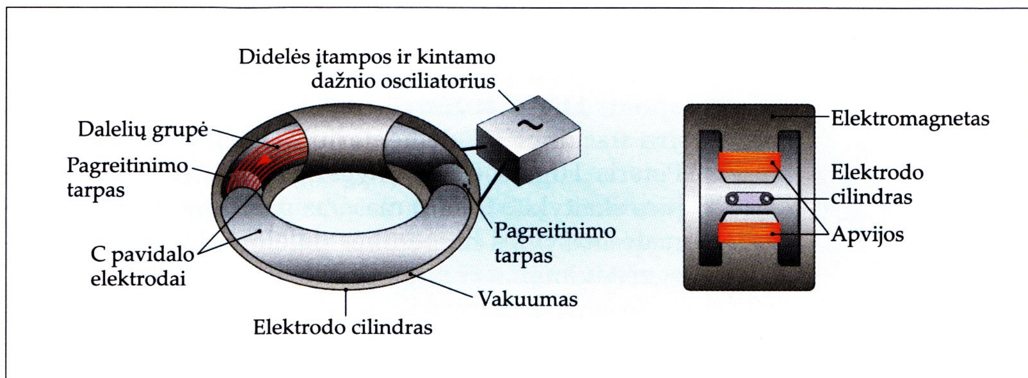
10.4.1 pav.

Dėl to pradėti kurti elementariųjų dalelių greitintuvai, kurie galėtų suteikti dalelėms kuo daugiau energijos.

Šiuolaikiniai dalelių greitintuvai skirstomi į tiesinius ir žiedinius. Tiesiniuose greitintuvuose dalelės greitinamos, kai juda tiesiu vakuuminiu tuneliu (10.4.1 pav.). Žiediniuose greitintuvuose, arba ciklotronuose, daleles judėti kreivomis trajektorijomis verčia magnetinis laukas (10.4.2 pav.). Jį sukuria dvi tuščiavidurės D pavidalo kameros dalys. Viena jų įelektrinta teigiamai, kita – neigiamai. Kameros dalys yra perskirtos nedidelio tarpo ir įtaisytos tarp magneto polių. Dalelę greitina elektrinis ir magnetinis laukas. Magnetinis laukas verčia ją suktis ratu, todėl greitėdama dalelė juda didėjančia spirale. Ciklotrone greitinamos dalelės įgyja 10^6 eV energijos ir yra nukreipiamos į taikinį. Kamerą pakeitus tuščiaviduriu žiedu, gaunamas šiuolaikinis žiedinis greitintuvas – sinchrotronas. Jame elektrinio ir magnetinio lauko kitimas yra suderintas su greitinamų dalelių judėjimu (10.4.3 pav.). Tuščiaviduriuose elektrodų cilindruose dalelės juda apskritimais. Prieš patekdamos į sinchrotroną, jos yra pagreitinamos ciklotrone. Dalelių susidūrimo energija padidinama pakeitus nejudamą tai-

10.4.2 pav.





10.4.3 pav.

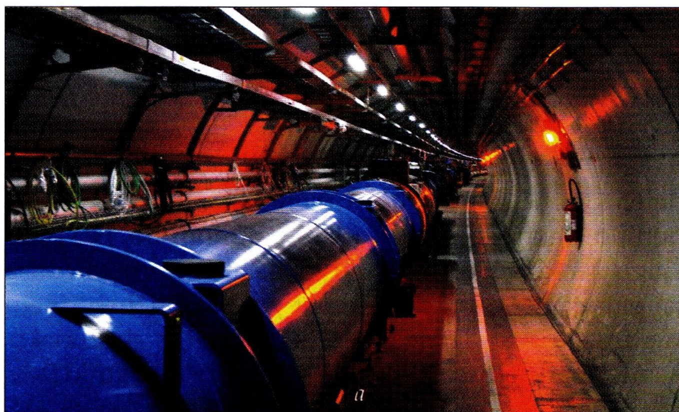
kinį į priešingomis kryptimis judančių dalelių srautus. Toks įrenginys 1989–2000 m. veikė Euròpos branduolìnių tyrìmų centrè (Šveicãrijoje). Jis vadinamas didžiuoju elektronų-pozitronų priešpriešinių srautų greitintuvu (LEP[1]). Kaupiamasis greitintuvo žiedas sumontuotas 26,7 km ilgio ir 3,8 m pločio tunelyje, iškastame apie 100 m gylyje po žeme. Elektronai ir pozitronai čia įgyja apie 10^{11} eV energijos. Naudojant tokius galingus sinchrotronus, buvo atrasta labai daug naujų elementariųjų dalelių.

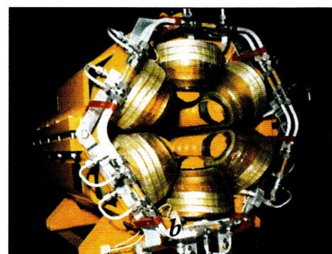
2008 m. Europos branduolinių tyrimų centre (CERN) buvo išbandytas vienas unikaliausių ir brangiausių įrenginių (10.4.4 pav., *a* ir *b*) – didysis hadronų priešpriešinių srautų greitintuvas (LHC[2]). Jame stiprūs magnetai (atšaldyti iki 1,9 K temperatūros) verčia protonų pluoštus judėti 27 km ilgio apskritimine trajektorija. Tie pluoštai juda priešpriešiais, kol įgyja reikiamą energiją. Paskui jie suglaudžiami, kad protonai susidurtų. Detektoriai fiksuoja, kas atsitiks. Lėkdami beveik šviesos greičiu, protonai pasunkėja

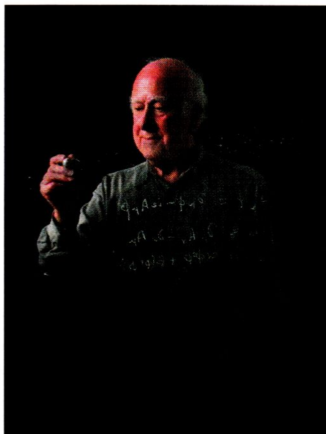
[1] LEP – anglų kalbos frazės **L**arge **E**lectron-**P**ositron Collider santrumpa.

[2] LHC – anglų kalbos frazės **L**arge **H**adron **C**ollider santrumpa.

10.4.4 pav.







Peteris Higsas

(dėl reliatyvumo) beveik 7500 kartų, o jų energija siekia 10^{12} eV. Šiuo eksperimentu tikimasi atsakyti į vieną svarbiausių klausimų: „Kas yra masė?" Norima aptikti Higso bozòną – dalelę, kuri, kaip manoma, yra atsakinga už elementariųjų dalelių masę. 1964 m. Peteris Higsas (*Peter Higgs*, g. 1929) hadrònų (apie juos skaitykite toliau) masėms paaiškinti teoriškai numatė masyvios hipotetinės dalelės – Higso bozono – egzistavimą.

Tęsiant elementariųjų dalelių tyrimus, naudojant galingus jų greitintuvus, atsirado būtinybė suklasifikuoti aptiktas daleles pagal tam tikras jų savybes.

Dalelių savybės

Svarbiausios dalelių savybės yra jų masė, elektros krūvis, vidutinė gyvavimo trukmė ir sukinys.

Dalẽlės mãsė priklauso nuo greičio ($E = mc^2$), todėl, kalbant apie ją, turima galvoje dalelės rimties masė. Ją įprasta reikšti energijos vienetais: megaelektronvoltais (MeV) arba gigaelektronvoltais (GeV). Lengviausios dalelės yra neutrinai.

Dalẽlių elèktros krū̃vis Q reiškiamas elementariojo elektros krūvio e vienetais. Jis yra sveikasis skaičius: $Q = 0, \pm 1$. Elektros krūvio vertė kinta diskretiškai.

Dauguma elementariųjų dalelių yra nestabilios. Jos gali virsti kitomis, ir šie virsmai – dalelių egzistavimo įrodymas. ***Vidutìnė dalẽlių gyvãvimo trukmė̃*** τ (stabilumo matas) matuojama sekundėmis. Elektronai, protonai, fotonai ir neutrinai yra stabiliosios dalelės ($\tau = \infty$), laisvasis neutronas – kvazinuostovioji dalelė ($\tau \approx 900$ s). Yra dalelių, kurių gyvavimo trukmė siekia nuo 10^{-6} s iki 10^{-25} s.

Viena svarbiausių dalelės savybių yra ***sukinỹs***, t. y. dydis, kokybiškai apibūdinantis dalelės sukimąsi.

1931 m. anglų fizikas Polis Dirakas (*Paul Dirac*, 1902–1984) numatė, kad gamtoje, be elementariųjų dalelių, yra ir antidalelių. Jis manė, jog dalelės ir antidalelės masė, gyvavimo trukmė bei sukinys yra vienodi, o elektros krūvis – tokio pat modulio, bet priešingų ženklų. 1932 m. bandymais atrastas pozitronas tai patvirtino. Gamtoje taip pat yra dalelių, neturinčių elektros krūvio. Tokios dalelės (fotonai, π^0 mezonai ir η mezonai) neturi ir antidalelių (dalelė ir antidalelė yra tapačios).

Polis Dirakas



Pozitronas, suartėjęs su elektronu, išnyksta – virsta gama (γ) fotonais ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$). Abiejų dalelių ($e^+$ ir e^-) energija virsta spinduliuote (2γ). Toks procesas vadinamas ***anihiliãcija*** (lot. *annihilatio* – išnykimas). Neutralios dalelės neišnyksta, o judančių lėčiau anihiliacija yra labiau tikėtina.

Medžiagą, susidedančią iš antidalelių, turėtume vadinti antimedžiaga. Jos antiatomas būtų sudarytas iš antibranduolio, t. y. antiprotonų ir antineutronų, o aplink jį skrietų antielektronai (pozitronai). Pirmąjį antibranduolį 1965 m. užregistravo JAV fizikai. Taip jie įrodė, kad iš antidalelių galima gauti panašių darinių kaip ir iš dalelių.

Keturios fundamentinės sąveikos

Elementariųjų dalelių tarpusavio sąveika nulemia jų virsmus. Šiandien yra žinoma, kad gamtą valdo keturios fundamentinės sąveikos (jėgos): gravitacinė, elektromagnetinė, stiprioji ir silpnoji.

Gravitãcinė sąveika, arba visuotinė trauka, būdinga visiems kūnams, turintiems masę. Masyvių kūnų (pavyzdžiui, žvaigždžių, planetų) ši sąveika yra nepaprastai stipri, o elementariųjų dalelių – labai silpna.

Elektromagnètinė sąveika būdinga kūnams (dalelėms), turintiems elektros krūvį. Tai geriausiai ištirta sąveika. Mus supančiame pasaulyje ji vyrauja.

Stipriόji sąveika reiškiasi labai mažais atstumais (apie 10^{-15} m). Ji laiko nukleonus atomų branduoliuose ir laiduoja jų stabilumą. Vykstant branduolinėms reakcijoms, dėl stipriosios sąveikos išsiskiria dideli energijos kiekiai.

Silpnόji sąveika būdinga daugeliui elementariųjų dalelių. Ji reiškiasi dar mažesniais atstumais negu stiprioji sąveika ir sukelia kai kuriuos elementariųjų dalelių virsmus: atomų branduolių beta (β) virsmus, nestabiliųjų dalelių skilimą.

Vaizdumo dėlei palyginkime šias sąveikas kiekybiškai, pagal jų stiprio koeficientų α (santykiniais vienetais) ir trukmės τ (sekundėmis) vertes.

Sąveikų stiprio koeficientai:

$$\alpha_{stipr} \approx 1,\ \alpha_{elektrom} \approx 10^{-2},\ \alpha_{silpn} \approx 10^{-14},\ \alpha_{gravit} \approx 10^{-38}.$$

Sąveikų trukmė (vidutinė):

$$\tau_{stipr} \approx 10^{-23}\ s,\ \tau_{elektrom} \approx 10^{-20}\ s,\ \tau_{silpn} \approx 10^{-13}\ s,\ \tau_{gravit} \approx ?\ s^{1}.$$

[1] Gravitacinės sąveikos tarp mikroskopinių objektų dar neištirtos.

Dalelių klasifikacija

Elementariąsias daleles bandyta grupuoti pagal jų masę. Tačiau pagal ją dalelės pasiskirsto labai netolygiai, todėl toks grupavimas nėra visiškai teisingas. Vėliau, ieškant naujų būdų daugybei elementariųjų dalelių klasifikuoti, buvo atsižvelgta ir į jų sąveiką. Taigi elementariosios dalelės skirstomos į tokias grupes:

- fotonus,
- leptonus,
- mezonus,
- barionus.

Detalią elementariųjų dalelių klasifikaciją ir pagrindines jų savybes rasite priedų 5 lentelėje (žr. p. 306).

Fotònai – dalelės, kurių krūvis ir rimties masė lygi nuliui. Atsiradęs fotonas iš karto įgyja greitį, lygų šviesos greičiui c ir masę m_f (žr. 9.3 temą).

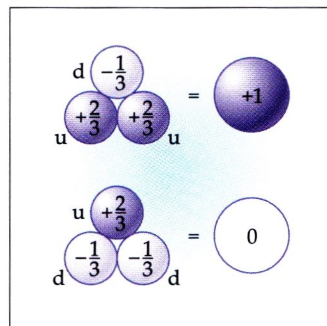
Leptònai (gr. *leptos* – plonas, smulkus) – mažos masės dalelės, kurioms būdinga tik silpnoji sąveika. Leptonų šeimą sudaro elektronas (e^-), pozitronas (e^+), elektroninis neutrinas ir antineutrinas (ν_e, $\tilde{\nu}_e$), miuonai (μ^+ ir μ^-), sunkieji tau leptonai (τ^+, τ^-), miuoninis neutrinas ir antineutrinas (ν_μ, $\tilde{\nu}_\mu$), tau neutrinas ir antineutrinas (ν_τ, $\tilde{\nu}_\tau$).

Mezònai (gr. *mesos* – vidutinis, tarpinis) ir ***bariònai*** (gr. *barys* – sunkus) yra dalelių šeimos, patiriančios stipriąją sąveiką. Abi kartu šios šeimos vadinamos ***hadrònais*** (gr. *hadros* – stambus). Hadronų grupė yra gausiausia (daugiau kaip 300 dalelių). Hadronai, kurių sukinys yra sveikasis skaičius, vadinami mezonais, o kurių pusinis – barionais. Mezonų šeimą sudaro piònai (π^+, π^-), kaònai (K^+, K^-) ir kt. Iš visų mezonų sudėtingiausiai elgiasi kaonai. Barionų šeimą sudaro protonas (p), neutronas (n), omega (Ω^-), sigma (Σ^-, Σ^+) ir lambda (Λ) hiperonai ir kt.

Atradus daugiau hadronų, paaiškėjo, kad elementariosios dalelės yra tik leptonai ir fotonai. Hadronai turi struktūrinių dalelių, kurios vadinamos ***kvárkais***. Kvarkų egzistavimo hipotezę 1964 m. iškėlė JAV fizikas Maris Gelis-Manas (*Murray Gell-Mann*, g. 1929). Vėliau ji buvo patvirtinta bandymais. Už elementariųjų dalelių sąveikų ir jų klasifikavimo darbus Geliui-Manui 1969 m. paskirta Nobelio premija. Paprasčiausias modelis rodo, kad egzistuoja trys kvarkai: kỹlantysis u (angl. *up*), kriñtantysis d (angl. *down*) ir

keistàsis s (angl. *strange*) (10.4.5 pav.). Kiekvienas kvarkas turi antidalelę – antikvarką. Šiuo metu yra žinomi šeši kvarkai ir šeši antikvarkai (žr. 5 lentelę). Kvarkai yra nematomi, pavieniai jie neegzistuoja.

Elementariųjų dalelių sąveiką ir virsmus lemia tvermės dėsniai: dalelių masės ir energijos, krūvio, judesio kiekio. Tačiau kai kurios reakcijos negali vykti, nors visi tvermės dėsniai galioja (pavyzdžiui, nevyksta reakcija $p \rightarrow e^+ + \pi^0$). Tokioms reakcijoms paaiškinti vartojama barioninio krūvio *B* sąvoka. Nagrinėjant nevykstančias reakcijas, atrastos dar vienos ilgai gyvuojančios dalelės. Jų neįmanoma nusakyti nei mase, nei elektros krūviu, nei barionų skaičiumi. Todėl tos dalelės buvo pavadintos keistosiomis. Jos apibūdinamos nurodant skaičių, vadinamą dalelės keistumu ir žymimą *S*. Dalelės keistumas yra tvarus. Įvairių dalelių keistumas *S* kinta nuo +3 iki –3.



10.4.5 pav.

Įrodyta, kad dalelių sąveikos pagrįstos virtualiosiomis dalelėmis. Šiandien fizikams yra žinoma, kad egzistuoja pakaitinės dalelės – bozònai, kurie perduoda fundamenines sąveikas iš vienos dalelės kitai. Šios virtualiosios dalelės dar vadinamos kalibraciniais bozonais (žr. 5 lentelę). Kitaip tariant, bozonai yra elementariųjų dalelių sąveikų nešliai. Stipriosios sąveikos nešliais laikomi gliuonai (g), elektromagnetinės sąveikos – fotonai (γ), silpnosios – tarpiniai bozonai (W^+, W^-, Z^0), o gravitacinės – gravitonai (jie iki šiol dar neaptikti).

Klausimai ir užduotys ??

1. Apibrėžkite elementariąsias daleles ir jas išvardykite.

2. Išvardykite šiuolaikinius dalelių greitintuvus.

3. Kokios yra pagrindinės elementariųjų dalelių savybės?

4. Nurodykite elementariųjų dalelių sąveikos rūšis.

5. Pagal ką ir į kokias grupes skirstomos elementariosios dalelės?

6. Kas yra kvarkas ir kokiomis prielaidomis grindžiama kvarkinė hadronų sandara?

7. Parenkite referatus „Elementariųjų dalelių pasaulis" ir „Didysis hadronų priešpriešinių srautų greitintuvas".

10.5. Elementariųjų dalelių registravimo prietaisai ir metodai

Pagrindinės sąvokos

Kòsminė spinduliuõtė, Geĩgerio skaitìklis, Vìlsono kãmera, burbulìnė kãmera, blyksimàsis skaitìklis, storaslúoksnių fotoemùlsijų metòdas, Vùlfo (impùlsinis) elektroskòpas.

Kosminė spinduliuotė

Žemę, be elementariųjų dalelių, iš kosminės erdvės pasiekia ***kòsminė spinduliuõtė***. Tai didelės energijos atomų branduolių (daugiausia protonų ir alfa dalelių) srautai. Jie buvo aptikti XX a. pradžioje, tiriant sauso oro jonizaciją. Kosminė spinduliuotė, kol pasiekia Žemės paviršių, pereina storą atmosferos sluoksnį, kuriame vyksta daugybė pokyčių. Vadinasi, tai, kas registruojama Žemės paviršiuje, iš tikrųjų yra jau antrinė kosminė spinduliuotė. Pirmine kosmine spinduliuote vadiname tai, kas yra už Žemės atmosferos ribų (planetų ir žvaigždžių skleidžiama spinduliuotė). Ji ateina iš visų pusių vienoda ir jos intensyvumas yra 2–4 dalelės/($cm^2 \cdot s$)[1].

Pirminei kosminei spinduliuotei patekus į Žemės atmosferą, prasideda antriniai procesai. Iš pradžių pirminės dalelės sukuria daug didelės energijos antrinių dalelių. Šios, jonizuodamos atmosferą, praranda savo kinetinę energiją. Vidutinė pirminių kosminių dalelių energija yra apie 10^{10} eV (≈10 GeV). Kosminės spinduliuotės sudėtis maždaug atitinka cheminių elementų paplitimą Visatoje. Tačiau lengvųjų elementų (Li, Be, B ir kt.) joje yra gerokai daugiau. Kosminėje spinduliuotėje aptinkama taip pat ir elektronų bei pozitronų.

Kosminės spinduliuotės šaltiniai yra Saulė ir žvaigždės (novos, supernovos ir kt.). Pastaruoju metu rasta naujų astronominių objektų – kvazarų ir pulsarų, kurie, kaip manoma, taip pat prisideda prie kosminės spinduliuotės kūrimo.

Atomo branduolį sudaro elementariosios dalelės, todėl bendri ir šių mokslo šakų tyrimo metodai. Toliau susipažinsime su prietaisais, kuriais gauta informacija apie mikropasaulyje vykstančius procesus yra labai svarbi branduolio ir elementariųjų dalelių fizikos raidai.

[1] Kosminės spinduliuotės intensyvumas didesniame nei 50–60 km aukštyje yra pastovus. Šios spinduliuotės intensyvumas apibūdinamas skaičiumi dalelių, pereinančių per 1 s pro vienetinio ploto paviršių.

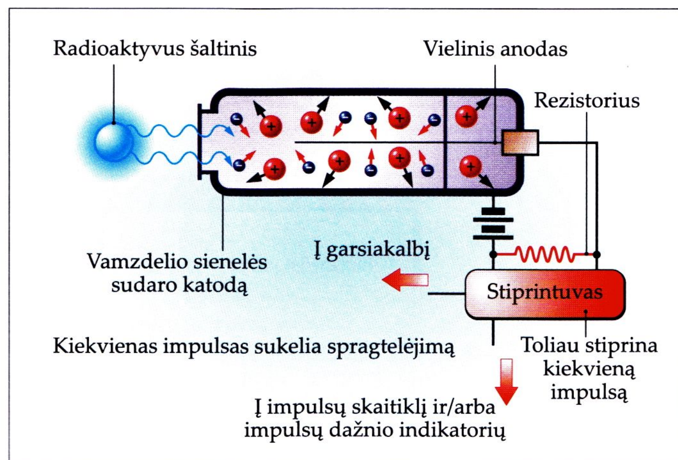
Elementariųjų dalelių savybėms tirti šiuo metu taikomi įvairūs metodai. Daugelis jų pagrįsti jonizuojamuoju ir fotocheminiu tiriamų elementariųjų dalelių poveikiu.

Susipažinsime su dažniausiai naudojamais elementariųjų dalelių registravimo prietaisais.

Geigerio skaitiklis

Gei̇̃gerio skaitikliù vadinamas prietaisas, susidedantis iš metalinio arba iš vidaus metalizuoto stiklinio vamzdelio, impùlsų skaitiklio (arba impulsų dažnio indikatoriaus), o dažnai – dar ir garsiakalbio (10.5.1 pav.). Vamzdelis pripildytas mažo tankio inertinių dujų (vandenilio, helio, argono ar kt.) ir turi du elektrodus: katodą, kurį atstoja vamzdelio sienelės, ir išilgai vamzdelio ašies ištemptą vielinį anodą. Prietaisas spinduliuotę fiksuoja registruodamas tarp elektrodų tekančios elektros srovės impulsus. Jie atsiranda dėl spinduliuotės sukeltos dujų jonizacijos. Elektroninis impulsų skaitiklis registruoja impulsus, o impulsų dažnio indikatorius matuoja tų impulsų greitį, t. y. vidutinį impulsų skaičių per sekundę.

Kaip veikia skaitiklis? Kiekviena dalelė ar spindulys, patekęs į vamzdelį pro ploną langelį, jonizuoja dujų atomus. Taip atsiranda teigiamieji jonai ir laisvieji elektronai. Elektrinis laukas tarp elektrodų juos pagreitina. Teigiamieji jonai juda prie katodo, o elektronai – prie anodo. Pakeliui jie susiduria su kitais dujų atomais ir patys juos jonizuoja – prasideda smūginė jonizacija. Elektronus anodas pagauna, o katodas



10.5.1 pav.

nustumia (leisdamas jonams vėl virsti neutraliais atomais). Grandinėje atsiranda srovės impulsas (sustiprintas griūties), kuris nukreipiamas į registravimo įrenginį.

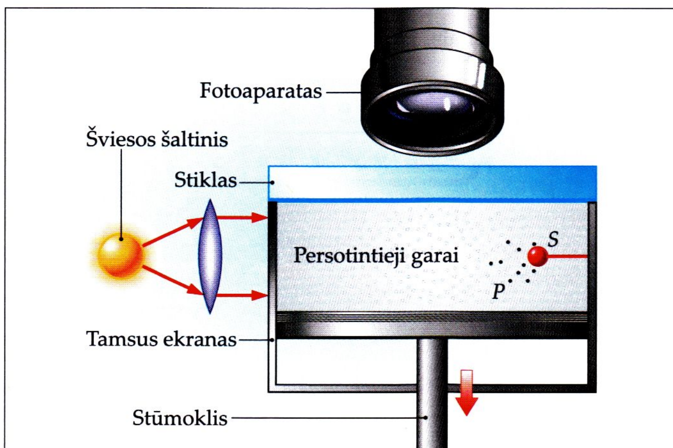
Geigerio skaitikliu paprastai registruojamos lengvesnės dalelės – elektronai ir gama kvantai. Sunkiąsias daleles (pavyzdžiui, alfa daleles) juo registruoti sunkiau, nes stiklinio vamzdelio langelis joms yra per storas – į vamzdelį patenka mažai alfa dalelių.

Vilsono kamera

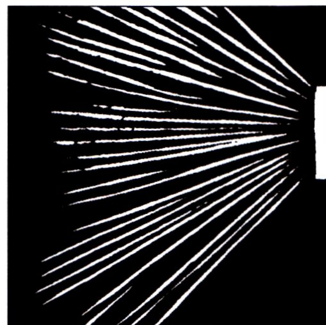
Vìlsono kãmera yra prietaisas, kuriuo galima stebėti alfa ir beta dalelių pėdsakus. Jie susidaro persotintųjų garų (alkoholio ar vandens) pripildytame sandariame inde, kai į jį patenka alfa arba beta dalelė.

Išsiaiškinkime, kaip visa tai vyksta. Prieš patenkant dalelei į kamerą, staiga padidinamas joje esančių sočiųjų garų tūris (nuleidžiant stūmoklį). Garai atvėsta ir pasidaro persotinti (10.5.2 pav.). Persotintaisiais vadiname tokius garus, kurių temperatūra žemesnė už jų kondensacijos temperatūrą ir kurie nesikondensuoja tol, kol juose nėra dulkelių ar kitų dalelių kondensacijos centrų. Taigi ši garų būsena yra nestabili. Jeigu tuo momentu į kamerą nukreipiama šaltinio S spinduliuotė, tai ji jonizuoja garus. Atsiradę jonai veikia kaip dulkelių dalelės, apie kurias aktyviai kondensuojasi garai, sudarydami mažyčius skysčio lašelius. Tų lašelių pėdsakai P išlieka pakankamai ilgai, taigi juos galima nufotografuoti (10.5.3 pav.).

10.5.2 pav.



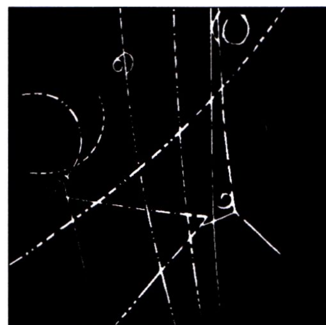
Vilsono kamera teikia daugiau informacijos apie elementariąsias daleles negu skaitikliai. Stebint dalelių pėdsakus, galima įvertinti dalelių energiją ir greitį. Pėdsako vienetinio ilgio atkarpoje susidariusių lašelių skaičius apibūdina dalelės greitį.



10.5.3 pav.

Burbulinė kamera

Burbulìnė kãmera, kaip ir Vilsono kamera, fiksuoja dalelių pėdsakus. Ji pripildyta skysčio (paprastai – vandenilio ar helio), kurio temperatūra yra aukštesnė už jo virimo temperatūrą. Tačiau skystis neverda, nes yra suslėgtas. Staiga sumažinus slėgį, skystis perkaista ir kurį laiką būna nestabilus. Tuo momentu į kamerą patekusi dalelė lėkdama savo kelyje jonizuoja skysčio atomus. Jonizacijos metu išsiskyrusi energija priverčia skystį virti ir jame atsiranda burbuliukų (10.5.4 pav.).

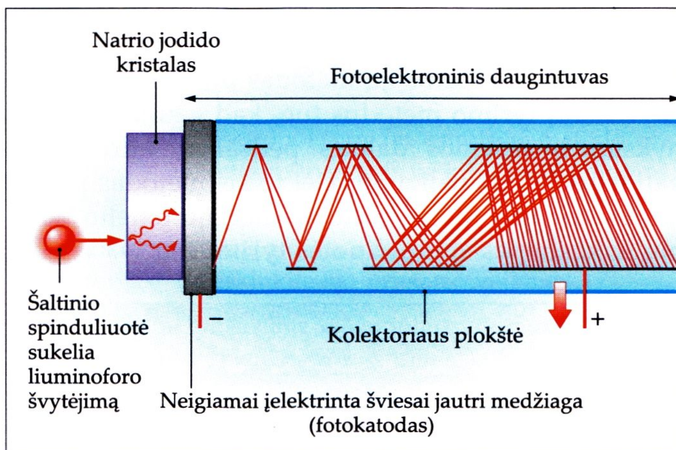


10.5.4 pav.

Burbulinėje kameroje esančios darbinės medžiagos (vandenilio ar helio) tankis yra didesnis negu Vilsono kameroje, todėl didesnės energijos dalelės čia palieka trumpesnius pėdsakus.

Blyksimasis skaitiklis

Taip vadinamas prietaisas (10.5.5 pav.), kuriuo galima aptikti gama spinduliuotę. Jį sudaro scintiliãtorius (lot. *scintillatio* – žėrėjimas, mirgėjimas) ir fotoelektròninis daugintùvas. Scintiliatorius yra kristalas (pavyzdžiui, natrio jodido), kuris dėl spinduliuotės poveikio blyksi. Veikiama šviesos, neigiamai įelekt-



10.5.5 pav.

rinta šviesai jautri medžiaga spinduliuoja elektronus. Pagrindinė fotodaugintuvo dalis – elektroninis daugintuvas. Elektrinis laukas, nukreiptas daugintuvo tolimojo galo link, pagreitina elektronus, šie atsitrenkia į metalo plokštes ir išlaisvina vis daugiau elektronų. Kiekvieną gama spindulį atitinka stiprus srovės impulsas. Jį registruoja impulsų skaitiklis arba impulsų dažnio indikatorius.

Storasluoksnių fotoemulsijų metodas

Greitos elektringosios dalelės, pereidamos plokštelę, padengtą fotoemulsija, jonizuoja joje esančius mikroskopinius sidabro bromido kristalėlių atomus. Jonizuotųjų atomų grandinė fotoemulsijoje sukuria paslėpto vaizdo centrus. Plokštelę chemiškai apdorojus, emulsijoje palikti dalelių pėdsakai pasidaro matomi (10.5.6 pav.).

Greitųjų dalelių pėdsakų ilgį galima keisti keičiant fotoemulsijos sluoksnio tankį. Emulsijos tankiui mažėjant, pėdsakas ilgėja, o didėjant, atvirkščiai – trumpėja. Iš pėdsako formos, ilgio bei storio ir emulsijos pajuodavimo tankio galima nustatyti dalelės energiją, greitį, masę ir judėjimo kryptį.

Tyrimams naudojamos storasluoksnės fotoemulsijos dar vadinamos branduolinėmis. Jų jautris ir storis (nuo 0,6 mm iki 1,2 mm) yra daug didesnis negu paprastų fotoemulsijų (nuo 10 μm iki 20 μm). Toks branduolinių emulsijų sluoksnio storis leidžia tirti didelių energijų dalelių trajektorijas. Pavyzdžiui, dalelės, kurios energija yra apie 10^6 eV, paliekamo pėdsako ilgis fotoemulsijoje yra apie 0,1 mm. Storasluoksnių fotoemulsijų metodas pranašesnis už kitus dalelių tyrimo metodus tuo, kad gaunamas neišnykstantis tiriamos dalelės pėdsakas, kurį vėliau galima detaliai analizuoti. Dėl to šis metodas plačiai ir sėkmingai taikomas didelių energijų dalelių savybių ir kosminės spinduliuotės tyrimuose.

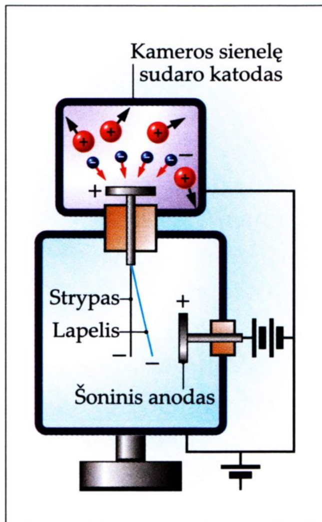
10.5.6 pav.



Vulfo elektroskopas

Vùlfo elektroskòpas kitaip dar vadinamas ***impùlsiniu elektroskopù***. Jo oro kameros sienelės apie galvutę sudaro katodą, o šoninis anodas įtaisomas netoli lapelio (10.5.7 pav.). Šis traukia elektronus iš galvutės žemyn, įelektrindamas ją teigiamai. Lapelis nutolsta nuo virbo (nes abu jie yra įelektrinti neigiamai), bet ne tiek, kad, nesant spinduliuotės, paliestų anodą. Lapelis užfiksuoja jonizuojančiąją spinduliuotę, paliesdamas anodą ir grįždamas atgal. Kaip tai realizuojama?

Radioaktyviojo šaltinio spinduliuotė metalinėje galvutėje jonizuoja kameros orą. Susidaro jonų ir elektronų griūtis (kaip ir Geigerio skaitiklyje). Jonai juda katodo link, o elektronai, patekę į kamerą, anodo yra traukiami žemyn, lapelio link. Lapelis pakrypsta į šoną ir paliečia anodą – atsiranda srovės impulsas. Tada lapelis išsielektrina ir spyruoklės grąžina jį prie virbo. Toliau vyksmas vėl kartojasi.



10.5.7 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Išvardykite pagrindinius elementariųjų dalelių registravimo prietaisus.

2. Kuo pagrįstas Geigerio skaitiklio veikimas?

3. Kuo skiriasi Vilsono ir burbulinės kameros veikimas?

4. Kuo burbulinė kamera pranašesnė už Vilsono kamerą?

5. Ar galima Vilsono kamera registruoti bekrūves daleles?

6. Paaiškinkite blyksimojo skaitiklio ir impulsinio elektroskopo veikimą.

7. Kokia yra storasluoksnių fotoemulsijų metodo esmė? Kuo šis metodas pranašesnis už kitus jums žinomus elementariųjų dalelių registravimo metodus?

8. Kokiu prietaisu galima stebėti elektringųjų dalelių trajektorijas? Paaiškinkite šio prietaiso veikimą.

9. Skaitiklis registruoja mažo intensyvumo radioaktyvaus preparato skleidžiamas α daleles. Ar laiko tarpai tarp bet kurių dviejų vienas po kito einančių registravimo momentų yra vienodi?

10.6. Radioaktyvumas

Pagrindinės sąvokos

Natūralùsis radioaktyvùmas,
radioaktỹviosios mẽdžiagos,
alfa, beta ir gama spinduliuõtė,
jonizúojančioji spinduliuõtė.



Anri Bekerelis

Radioaktyvumo samprata

Savaiminis vienų atomų branduolių virsmas kitų atomų branduoliais, kurio metu skleidžiama jonizuojančioji spinduliuotė ir kai kurios elementariosios dalelės, vadinamas ***natūraliúoju radioaktyvumù***. 1896 m. šį reiškinį pirmasis atrado prancūzų mokslininkas Anri Bekerelis (*Henri Becquerel*, 1852–1908). Jis eksperimentavo su fluorescuojančiomis medžiagomis, norėdamas sužinoti, ar jos neskleidžia rentgeno spindulių. Fluorescei̇̃ncija – kai kurių medžiagų, veikiamų ultravioletinės spinduliuotės ar saulės šviesos, švytėjimas. Urano druska buvo viena iš tų medžiagų, kuri švytėjo veikiama saulės šviesos.

Radioaktyvumo reiškinį Bekerelis aptiko visiškai atsitiktinai, atlikdamas tokius bandymus. Fotoplokštelę jis suvyniojo į juodą popierių, ant jo viršaus pabėrė urano druskos ir padėjo prieš saulę. Išryškinęs plokštelę, mokslininkas pastebėjo, kad ji pajuodavo tik tose vietose, kur buvo paberta druskos. Bekerelis manė, kad urano druskų spinduliuotę sukelia saulės šviesa. Tačiau jis nebuvo tikras, ar tiriama urano druska skleidžia rentgeno spinduliuotę. Norėdamas tai patikrinti, bandymą jis sumanė pakartoti. Ant fotoplokštelės uždėjo ploną aliuminio plokštelę, o ant jos – varinį kryžių, padengtą urano druska. Tačiau diena pasitaikė debesuota ir bandymą teko atidėti. Paruoštą bandinį Bekerelis įdėjo į stalo stalčių. Po keleto dienų jis išryškino plokštelę ir nustebo išvydęs joje uždėto kryžiaus formos atvaizdą.

Gauti rezultatai piršo mintį, kad urano druska, net ir neveikiama saulės šviesos, savaime skleidžia kažkokius nežinomus spindulius. Tyrimai, atlikti su kitomis urano druskomis, patvirtino ankstesnę savybę – ir kitos urano druskos skleidžia iki tol nežinomą spinduliuotę. Prasidėjo intensyvūs urano druskų tyrinėjimai. Bekereliui pavyko nustatyti, kad urano druska spinduliuotę skleidžia savaime ir nuolat, be to, ši spinduliuotė visiškai nepriklauso nuo išorinių sąlygų: apšvietos, temperatūros ir slėgio. Išbandęs įvairius urano junginius, Bekerelis ištyrė, kad urano druskų skleidžiamos spinduliuotės intensyvumas priklauso

ne nuo junginių rūšies, o tik nuo urano kiekio bandinyje. Vadinasi, aptikta urano druskų spinduliuotė greičiausiai būdinga tik urano atomams.

Atradus urano spinduliuotę, bandyta išsiaiškinti, ar panaši spinduliuotė nebūdinga kitiems cheminiams elementams. 1898 m. prancūzų mokslininkas Pjeras Kiuri (*Pierre Curie*, 1859–1906) ir jo žmona Marija Sklodovska-Kiuri (*Marie Skłodowska-Curie*, 1867–1934) aptiko torio, radžio ir polonio spinduliuotę. Tolesni tyrimai parodė, kad visi cheminiai elementai, kurių eilės numeriai Mendelejevo periodinėje elementų sistemoje yra didesni už 83, skleidžia panašią spinduliuotę. Už radioaktyvumo tyrimus ir radžio atradimą Bekerelis ir sutuoktiniai Kiuri 1903 m. pelnė Nobelio premiją.



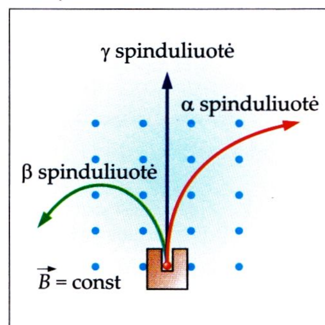
Marija Sklodovska-Kiuri ir Pjeras Kiuri

Aprašyta spinduliuotė vadinama ***jonizúojančiąja spinduliuotè***. Veikdama medžiagų atomus ar molekules, ji geba juos jonizuoti, t. y. išplėšti iš jų elektronus. ***Medžiagos, kurios skleidžia naujos rūšies spinduliuotę, buvo pavadintos radioaktyviõsiomis, o jų savybė skleisti ypatingą spinduliuotę – radioaktyvumù.***

Alfa, beta ir gama spinduliuotė

Naujų radioaktyviųjų elementų atradimas mokslininkus paskatino pradėti nagrinėti šių elementų skleidžiamos spinduliuotės savybes ir fizikinę prigimtį. Šioje srityje daug nuveikė Anri Bekerelis, sutuoktiniai Marija ir Pjeras Kiuri ir Ernestas Rezerfordas. Netrukus buvo nustatyta, kad visos radioaktyviosios medžiagos skleidžia trijų rūšių spinduliuotę. Jonizuojančiosios spinduliuotės sudėtį pirmoji išaiškino Marija Kiuri. Ji ištyrė, kaip radioaktyviųjų medžiagų skleidžiamą spinduliuotę veikia magnetinis laukas. Spindulių pluoštas jame suskildavo į tris pluoštelius (10.6.1 pav.). Du iš jų nukrypdavo į priešingas puses. Vadinasi, pluošteliais sklido priešingo ženklo elektros krūvininkai. Neigiamųjų krūvininkų pluoštelis nukrypdavo labiau negu teigiamųjų. Trečiasis pluoštelis magnetiniame lauke savo sklidimo krypties nepakeisdavo. Teigiamųjų krūvininkų pluoštelis buvo pavadintas ***alfa*** (α) ***spinduliuotè***, arba α dalelių srautu, neigiamųjų – ***beta*** (β) ***spinduliuotè***, o nepaveiktas magnetinio lauko (elektriškai neutralus) – ***gama*** (γ) ***spinduliuotè***.

10.6.1 pav.



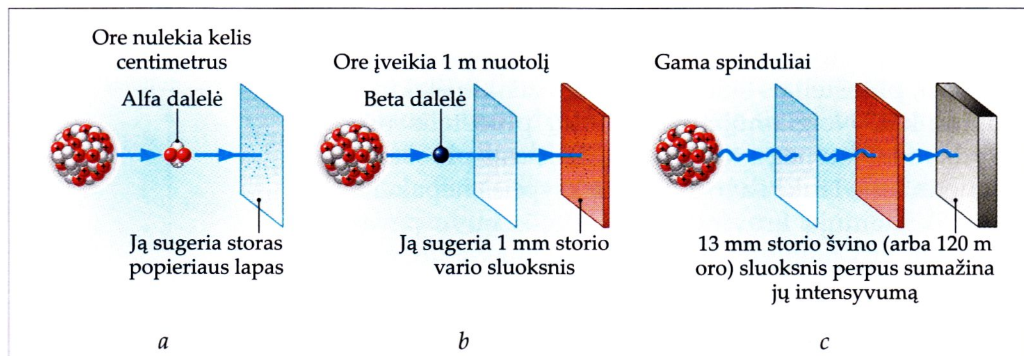
Pagal α dalelių srauto nuokrypį Rezerfordas nustatė jų krūvio ir masės santykį. Tačiau dalelės masė ir krūvis liko nežinomi. Jos krūvis buvo išmatuotas sukūrus Geigerio skaitiklį. Alfa spindulių kelyje Rezerfordas padėjo Geigerio skaitiklį, kuris registruodavo, kiek dalelių patekdavo į jį per tam tikrą laiką. Paskui tą patį srautą jis nukreipdavo į metalinį ritinį, sujungtą su elektrometru, ir matuodavo per tą patį laiką į ritinį patekusių α dalelių krūvį. Žinodamas dalelių skaičių ir bendrą jų krūvį, jis apskaičiavo kiekvienos α dalelės krūvį ir masę. Krūvis buvo lygus dviem elementariesiems krūviams (+2*e*). Vėliau buvo nustatyta, kad alfa spinduliuotė yra helio atomų branduolių srautas. Alfa spinduliuotė yra mažiausiai skvarbi, pro 0,1 mm storio popieriaus sluoksnį ji nepereina, tačiau veikia fotoplokštelę, jonizuoja dujas.

Su beta spinduliuote buvo lengviausia atlikti bandymus, nes šis pluoštelis pakankamai ryškiai nukrypdavo magnetiniame lauke. Pirmiausia reikėjo nustatyti krūvininkų masę ir elektros krūvį. Ištyrus paaiškėjo, kad β spinduliuotė – tai greitai skriejantys elektronai. Jie pasirodė esą skvarbesni už α daleles. Elektronus gali sulaikyti tik kelių milimetrų storio aliuminio plokštelė.

Gama spinduliuotė savo savybėmis primena rentgeno spinduliuotę, tačiau yra skvarbesnė. Ištyrus jos sugertį ir sklaidą medžiagoje, įsitikinta, kad γ spinduliuotė yra labai trumpos elektromagnetinės bangos. Šį faktą patvirtino ir pastebėta γ spinduliuotės difrakcija nuo kristalų. Tokiu metodu nustatytas ir šios spinduliuotės bangos ilgis. Jis buvo labai mažas – nuo 10^{-8} cm iki 10^{-11} cm.

Alfa, beta ir gama spinduliuotės skvarbą iliustruoja 10.6.2 paveikslas.

10.6.2 pav.



Klausimai ir užduotys

1. Kas pirmasis pastebėjo radioaktyvumo reiškinį?

2. Ką vadiname natūraliuoju radioaktyvumu?

3. Kokiu metodu buvo aptikta radioaktyvioji spinduliuotė?

4. Kas ją sudaro?

5. Nusakykite jonizuojančiosios spinduliuotės sudedamųjų dalių savybes.

6. Kur ilgesnė α dalelės trajektorija: viršutiniuose atmosferos sluoksniuose ar Žemės paviršiuje?

7. Polonio preparatas kas sekundę išspinduliuoja $3{,}7 \cdot 10^9$ alfa dalelių, kurių energija $5{,}3 \cdot 10^6$ eV. Kiek energijos šis preparatas išskiria per 1 h? (11,3 J)

8. Iš radžio branduolio $1{,}5 \cdot 10^7$ m/s greičiu išlėkusi α dalelė ore nuskriejo 3,3 cm ir sustojo. Apskaičiuokite šios dalelės:

a) kinetinę energiją; (4,7 MeV)
b) lėkio trukmę; ($4{,}4 \cdot 10^{-9}$ s)
c) skriejimo pagreitį. ($3{,}4 \cdot 10^{15}$ m/s^2)

10.7. Radioaktyvieji virsmai

Radioaktyviųjų branduolių virsmų samprata

1903 m. Ernestas Rezerfordas ir anglų chemikas Frederikas Sodis (*Frederick Soddy*, 1877–1956), tirdami radioaktyviųjų medžiagų skleidžiamą spinduliuotę, nustatė, kad jos priežastis yra savaiminis medžiagų atomų skilimas. Bandymų rezultatai vertė abejoti atomų nekintamumu. Rezerfordui pavyko išsiaiškinti, kad, savaime skylant radioaktyviajai medžiagai, keičiasi ir jos atomai. Dėl to susidaro nauja medžiaga. Bandymai parodė, kad ji tiek savo fizinėmis, tiek cheminėmis savybėmis skiriasi nuo pirminės medžiagos. Tačiau nauja medžiaga taip pat nėra stabili. Ji virsta

Pagrindinės sąvokos

Radioaktyvių̃jų branduolių̃ virsmai̇̃,
póslinkio taisỹklė,
radioaktỹviojo skilìmo dė́snis,
radioaktyviõsios mẽdžiagos aktyvùmas,
radioaktyviõsios mẽdžiagos aktyvùmo matãvimo víenetai: bekerèlis, kiùris ir rèzerfordas,
pusė́jimo trukmẽ,
atòminės mãsės víenetas.

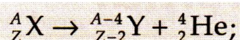
jau kita medžiaga, skleisdama tam tikrą jonizuojančiąją spinduliuotę.

1911 m. Rezerfordui išaiškinus atomo branduolio sandarą, pasidarė aišku, kad jonizuojančiąją medžiagų spinduliuotę lemia procesai, vykstantys atomų branduoliuose. Tai buvo pagrįsta tokiais faktais: pirma, α dalelių atomo elektroniniame apvalkale nėra; antra, iš apvalkalo išlėkus elektronui (β dalelei), atomas virsta jonu. Bandymu gauta nauja medžiaga buvo ne jonas, o naujas cheminis elementas. Vadinasi, vykstant savaiminiam radioaktyviųjų medžiagų atomų branduolių skilimui, vienų cheminių elementų branduoliai virsta kitų cheminių elementų branduoliais. Proceso metu išsiskiria energija.

Poslinkio taisyklė

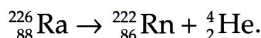
Branduolių virsmai vyksta pagal tam tikrus dėsningumus, kuriuos pirmasis suformulavo Sodis. Šie dėsningumai buvo pavadinti ***póslinkio taisỹklėmis***.

Alfa skilimo (t. y. virsmo, kurio metu branduolys skleidžia α daleles) poslinkio taisyklė formuluojama taip: alfa skilimo metu branduolys netenka teigiamojo elektros krūvio, savo skaitine verte prilygstančio dviejų elektronų krūviui (+2*e*), ir masės, apytiksliai lygios keturiems atominės masės vienetams[1]. Dėl to susidaręs naujas elementas pasislenka į periodinės cheminių elementų lentelės pradžią per du langelius. Šį poslinkį galime užrašyti simboliais:



$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}; $$

čia X ir Y – cheminių elementų simboliai, Z – branduolyje esančių protonų skaičius (branduolio krūvis), lygus atitinkamo elemento eilės numeriui periodinėje cheminių elementų lentelėje, A – masės skaičius (branduolio protonų skaičiaus Z ir neutronų skaičiaus N suma), ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ – helio atomo branduolys (α dalelė). Pateikiame šios rūšies branduolių virsmo (alfa skilimo) pavyzdį:

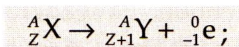


$$ {}^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}. $$

Beta skilimo poslinkio taisyklė formuluojama taip: beta skilimo metu iš branduolio išlekia elektronas, dėl to susidariusio naujo elemento branduolio krūvis padidėja vienetu, o masė beveik nepakinta. Naujas che-

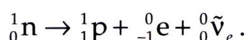
[1] Atomo ir branduolio fizikoje dalelių masei reikšti vartojamas unifikuotas (lot. *unifico* – vienodinu) ***atòminės mãsės víenetas***. Jis žymimas raide u. 1 u = 1,66 · 10^{-27} kg.

minis elementas pasislenka per vieną langelį arčiau periodinės cheminių elementų lentelės galo. Užrašykime beta skilimą simboliais:


$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e;$$

čia ${}^{0}_{-1}e$ – simbolinis elektrono užrašas (viršutinis simbolio indeksas 0 rodo, kad elektrono masė yra labai maža, palyginti su atominės masės vienetu; $m_e =$ $= 5{,}486 \cdot 10^{-4}$ u).

Kaip paaiškinti, iš kur branduolyje atsiranda elektronų, jeigu, pasak planetinio modelio, atomo branduolyje yra susitelkusios teigiamąjį krūvį turinčios dalelės (protonai) ir neutralios dalelės (neutronai)? Paaiškinimas gali būti toks: beta skilimo metu protonai ir neutronai (atrasti 1932 m.) gali virsti vieni kitais. Laisvojo neutrono masė ($m_n = 1{,}6749 \cdot 10^{-27}$ kg $=$ $= 1{,}00866$ u) didesnė už elektrono ir protono mases, sudėtas kartu. Todėl neutrono energija yra didesnė už elektrono ir protono energijų sumą. Vadinasi, neutronas (žymimas ${}^{1}_{0}n$) gali savaime virsti protonu (žymimas ${}^{1}_{1}p$), išspinduliuodamas elektroną ir elektriškai neutralią elementariąją dalelę antineutriną, neturintį nei elektros krūvio, nei rimties masės. Tai galima užrašyti simboliais:


$${}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\tilde{\nu}_e .$$

Vienam neutronui virtus protonu, branduolio elektros krūvis padidėja vienetu. Todėl naujo elemento eilės numeris periodinėje cheminių elementų lentelėje yra vienetu didesnis. Atomų branduolių virsmo metu susidarę nauji cheminiai elementai taip pat yra radioaktyvūs ir skyla. Šie procesai tęsiasi tol, kol gaunami stabilūs cheminių elementų branduoliai.

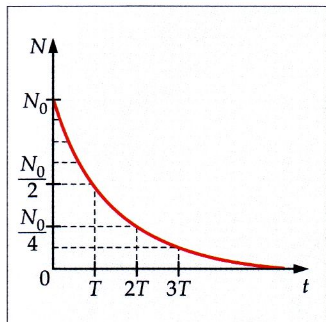
Radioaktyviojo skilimo dėsnis

Tyrimai parodė, kad radioaktyviųjų medžiagų aktyvumas ilgainiui mažėja. Kiekvieną radioaktyvųjį elementą apibūdina laiko tarpas, per kurį elemento aktyvumas sumažėja perpus, kitaip tariant, laiko tarpas, per kurį suskyla pusė pradiniu laiko momentu buvusių radioaktyviosios medžiagos atomų branduolių. Šis laiko tarpas vadinamas ***pusėjimo trukmė*** ir žymimas T. Antra vertus, ***pusėjimo trukmė yra fizi-***

kinis dydis, apibūdinantis radioaktyviojo elemento skilimo spartą. Kuo ji trumpesnė, tuo greičiau skyla atomai. Įvairių radioaktyviųjų elementų pusėjimo trukmė yra nevienoda. Pavyzdžiui, radžio ($^{226}_{88}Ra$) ji lygi 1620 m., torio ($^{231}_{90}Th$) – 25,64 h, polonio ($^{212}_{84}Po$) – 3 min, o urano ($^{238}_{92}U$) siekia net 4,5 mlrd. m.

Radioaktyviojo skilimo dėsnį nustatė Frederikas Sodis. Matematinė šio dėsnio išraiška yra tokia:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}; \qquad (10.2)$$



10.7.1 pav.

čia N_0 – radioaktyviųjų atomų branduolių skaičius pradiniu laiko momentu ($t = 0$), N – iki momento t nesuskilusių atomų branduolių skaičius, T – radioaktyviojo elemento atomų branduolių pusėjimo trukmė. Iš 10.2 formulės išplaukia, kad per laiko tarpą t, lygų elemento atomų pusėjimo trukmei ($t = T$), pradinis radioaktyviųjų atomų skaičius sumažėja perpus. 10.7.1 paveiksle pavaizduota, kaip kinta radioaktyviojo elemento atomų skaičius N, atsižvelgiant į laiką t, išreikštą pusėjimo trukme T.

Radioaktyviõsios mẽdžiagos aktyvumù vadinsime tos medžiagos atomų branduolių, suskylančių per vienetinį laiką (1 s), skaičių. Jonizuojančioji spinduliuotė praktikoje dažniausiai registruojama skaitikliais. Medžiagos aktyvumo matavimo vienetas SI sistemoje yra *bekerèlis* (žymimas Bq). Taigi 1 Bq = 1 s^{-1}, t. y. vienas virsmas per sekundę.

Praktikoje plačiai vartojamas nesisteminis medžiagos aktyvumo matavimo vienetas – *kiùris* (žymimas Ci):

$$1 \text{ Ci} = 3{,}7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 3{,}7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}.$$

Sakoma, kad radioaktyviosios medžiagos aktyvumas lygus 1 Ci, jeigu per 1 s suskyla $3{,}7 \cdot 10^{10}$ jos atomų. Medžiagos aktyvumui matuoti kai kada prireikia ir dalinių matavimo vienetų – *milikiùrio* (mCi), *mikrokiùrio* (μCi):

$$1 \text{ mCi} = 10^{-3} \text{ Ci} = 3{,}7 \cdot 10^{7} \text{ Bq},$$
$$1 \text{ μCi} = 10^{-6} \text{ Ci} = 3{,}7 \cdot 10^{4} \text{ Bq}.$$

Kartais dar vartojamas aktyvumo vienetas, vadinamas *rèzerfordu* (žymimas Rd):

$$1 \text{ Rd} = 10^{6} \text{ Bq}.$$

Šie vienetai susiję taip: 1 mCi = 37 Rd.

Radioaktyviojo skilimo dėsnio teorinis išvedimas

Tikėtina, kad, vykstant savaiminiam radioaktyviajam skilimui, per laiko tarpą Δt suskils ΔN atomų. Sakykime, pradiniu laiko momentu ($t = 0$) nesuskilusių atomų yra N. Tada galima parašyti tokią lygtį:

$$\Delta N \approx -\lambda N \Delta t.$$

Minuso ženklas rodo, kad nesuskilusių atomų skaičius laikui bėgant mažėja. λ yra skilimo konstanta. Iš lygties išreikškime santykį $A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$, kuris nusako radioaktyviojo elemento aktyvumą, t. y. per vieną sekundę suskilusių atomų skaičių. Iš tos pačios lygties išreikškime skilimo konstantą λ:

$$\lambda = -\frac{\frac{\Delta N}{N}}{\Delta t}. \qquad (10.3)$$

Matome, kad ji rodo santykinį skylančių atomų skaičiaus sumažėjimą per vienetinį laiką. Šios konstantos matavimo vienetas yra $[\lambda] = 1\ \mathrm{s}^{-1}$. Vadinasi, skilimo konstanta rodo radioaktyviojo elemento skilimo spartą. Dydis, atvirkščias skilimo spartai, yra radioaktyviojo elemento gyvavimo trukmė τ: $\tau = \frac{1}{\lambda}$.

Pertvarkę 10.3 lygtį, gauname radioaktyviojo skilimo dėsnio išraišką:

$$N = N_0 \mathrm{e}^{-\lambda t}; \qquad (10.4)$$

čia N_0 – pradiniu laiko momentu ($t = 0$) nesuskilusių branduolių skaičius, N – laiko momentu t nesuskilusių branduolių skaičius. Pritaikę jau žinomą pusėjimo trukmės sąvoką, iš 10.4 lygties gauname:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \mathrm{e}^{-\lambda T}. \qquad (10.5)$$

Abi lygybės puses išlogaritmavę ir atlikę nesudėtingus matematinius veiksmus, gauname tokias sąsajas:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda} = 0{,}693\tau. \qquad (10.6)$$

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname atominės masės vienetu?

2. Kokių taisyklių laikomasi rašant atomų branduolių virsmų lygtis?

3. Nusakykite poslinkio taisyklę, taikomą alfa skilimui.

4. Nusakykite poslinkio taisyklę, taikomą beta skilimui.

5. Paaiškinkite, kodėl radioaktyvieji atomų branduoliai skleidžia β spinduliuotę.

6. Suformuluokite radioaktyviojo skilimo dėsnį.

7. Ką vadiname radioaktyviojo elemento pusėjimo trukme?

8. Kas apibūdina radioaktyviosios medžiagos skilimo spartą?

9. Ką vadiname radioaktyviosios medžiagos aktyvumu?

10. Kuo skiriasi skilimo sparta nuo medžiagos aktyvumo?

11. Apibrėžkite radioaktyviosios medžiagos aktyvumo matavimo vienetą.

12. Radioaktyviojo elemento aktyvumas per 8 paras sumažėjo 4 kartus. Apskaičiuokite to elemento pusėjimo trukmę. (4 paros)

13. Radioaktyvaus elemento radžio pusėjimo trukmė lygi 1620 metų. Per kiek laiko radžio atomų skaičius sumažės 4 kartus? Kokia yra vidutinė radžio atomo gyvavimo trukmė? (Per 3240 metų; ≈ 4675 metai)

14. Per 8 h radioaktyviojo izotopo pradinis kiekis sumažėjo 3 kartus. Kiek kartų jis sumažės per parą? (27 kartus)

15. Kokiam radioaktyviajam skilimui vykstant plutonis $^{239}_{94}Pu$ virsta uranu $^{235}_{92}U$?

16. Kokiam radioaktyviajam skilimui vykstant natris $^{22}_{11}Na$ virsta magniu $^{22}_{12}Mg$?

17. Kokiu elementu virs radioaktyvusis ličio $^{8}_{3}Li$ atomas po vieno beta skilimo ir vieno alfa skilimo? Parašykite reakcijų lygtis. (Dviem α dalelėmis)

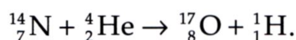
18. Kiek įvyksta alfa ir beta skilimų, kol uranas $^{238}_{92}U$ virsta švinu $^{206}_{82}Pb$? Parašykite reakcijų lygtis. (8 alfa skilimai ir 6 beta skilimai)

10.8. Atomo branduolys

Protono atradimas

Natūralaus radioaktyvumo atradimas buvo labai svarbus toliau tiriant atomo branduolio sandarą ir jo savybes. Turint jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinį, atsirado galimybė zonduoti atomų branduolius α dalelėmis. Joms sąveikaujant su medžiagos atomų branduoliais, buvo galima dirbtinai pakeisti branduolius. Pirmąją tokios rūšies reakciją 1919 m. atliko Ernestas Rezerfordas, apšaudydamas azoto dujas α dalelėmis. Paaiškėjo, kad, dirbtinai keičiant azoto atomų branduolius, išspinduliuojama elementarioji dalelė. Tai buvo teigiamąjį krūvį ($+1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C) turinti dalelė, kuri sudaro vandenilio atomo branduolį. Jos masė ($m_p = 1{,}6724 \cdot 10^{-27}$ kg $= 1{,}00728$ u) yra 1836,1 karto didesnė negu elektrono. Ši elementarioji dalelė pavadinta ***protonù*** (žymima ^1_1p arba ^1_1H).

Branduolinę reakciją, kuriai vykstant buvo gautas protonas, užrašykime simboliais:



$$^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H.$$

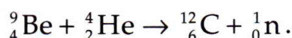
Neutrono atradimas

1932 m. Ernesto Rezerfordo mokinys anglų fizikas Džeimsas Čadvikas (*James Chadwick*, 1891–1974), švitindamas berilio branduolius α dalelėmis, pastebėjo labai skvarbią spinduliuotę. Iš pradžių jis manė, kad tai didelės energijos γ spinduliuotė. Tačiau vėliau ištyręs nustatė, jog ši spinduliuotė yra naujos rūšies elektriškai neutralių (neturinčių elektros krūvio) dalelių srautas. Neturėdamos elektros krūvio, dalelės yra labai skvarbios. Jų nestabdo Kulono sąveika nei su atomų elektronais, nei su jų branduoliais. Tačiau dalelės sąveikauja su branduoliais ypatingos rūšies jėgomis, kurios vėliau buvo pavadintos branduolinėmis. Naujosios dalelės masė ($m_n = 1{,}6749 \cdot 10^{-27}$ kg $=$ $= 1{,}00866$ u) yra šiek tiek didesnė negu protono ir 1836,6 karto didesnė negu elektrono. Ji buvo pavadinta ***neutronù*** (žymima ^1_0n).

Pagrindinės sąvokos

Protònas,
neutrònas,
protòninis-neutròninis bránduolio mòdelis,
nukleònas,
mãsės skaĩčius,
branduolìnės jẽgos,
stiprióji sąveika,
izotòpas.

Istorinę branduolinę reakciją, kuriai vykstant pirmą kartą aptiktas neutronas, simboliais galime užrašyti taip:



$$ {}^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}. $$

Neutrono atradimas buvo svarbus tolesnei branduolio fizikos raidai.

Protoninis-neutroninis atomo branduolio modelis



Verneris Heizenbergas

Neutrono atradimas padėjo galutinai suprasti atomo branduolio sandarą. Tais pačiais metais (1932 m.) vokiečių fizikas Verneris Heizenbergas (*Werner Heisenberg*, 1901–1976) ir rusų mokslininkas Dmitrijus Ivanenka (1904–1994) atskirai vienas nuo kito pasiūlė ***protònin̨į-neutrònin̨į brándųolio mòdelį***. Netrukus jis buvo patvirtintas bandymais ir fizikų visuotinai pripažintas. Remiantis šiuo modeliu, sukurta šiuolaikinė atomo branduolio teorija.

Pagal protoninį-neutroninį modelį branduolį sudaro protonai ir neutronai. Šios dalelės kartu buvo pavadintos ***nukleònais***. Taigi branduolio dalelė nukleonas gali būti dvejopos elektros krūvio būsenos: protonas, kurio krūvis $+e$, ir neutronas, kurio krūvis lygus nuliui. Lieka išsiaiškinti: pirma, kiek ir kokių elementariųjų dalelių yra branduolyje; antra, kokios jėgos jame laiko protonus ir neutronus?

Atomas yra elektriškai neutralus. Vadinasi, protonų jo branduolyje yra tiek pat, kiek elektronų apvalkale. Tada protonų skaičius turi rodyti atomo branduolio krūvį. Antra vertus, jis lygus cheminio elemento eilės numeriui periodinėje elementų lentelėje. Branduolio protonų skaičius žymimas raide Z, o neutronų skaičius – raide N. Bendras branduolio protonų (Z) ir neutronų (N) skaičius vadinamas ***mãsės skaĩčiumi*** ir žymimas raide A. Taigi branduolio masės skaičius A nusako ir nukleonų skaičių:

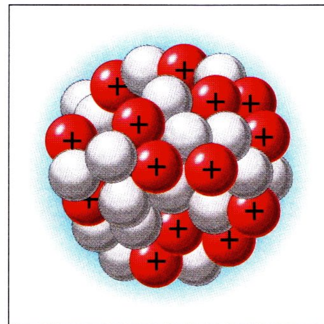
$$A = Z + N.$$

Simboliais užrašant cheminį elementą, skaičius Z nurodomas kaip apatinis elemento simbolio indeksas, o skaičius A – kaip viršutinis: ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$.

Atomo branduolio, susidedančio iš elementariųjų dalelių, modelis pateiktas 10.8.1 paveiksle. Žinome,

kad protono ir neutrono masė yra artima atominės masės vienetui, o elektrono masė lygi 0,00055 u. Vadinasi, atomo elektronų masė yra daug mažesnė už branduolio masę. Todėl branduolio masės skaičių A apytiksliai galima prilyginti cheminio elemento atominei masei, suapvalintai iki sveikojo skaičiaus.

Dabar jau galime atsakyti į klausimą, kokios jėgos išlaiko branduolyje nukleonus. Į atomo branduolio sudėtį įeinančios dalelės – protonai – turi teigiamąjį elektros krūvį, o neutronai jo visai neturi, todėl Kulono stūmos jėgų veikiamas branduolys turėtų subyrėti į atskiras dalis. Tačiau taip nėra – branduoliai yra pastovūs. Vadinasi, tą jų pastovumą turi lemti kažkokios ypatingos, neelektrinės jėgos, kuriomis sąveikauja nukleonai. Tai negali būti gravitacijos jėgos, nes jos labai silpnos. ***Traukos jėgos, kuriomis atomo branduolyje sąveikauja protonai ir neutronai, vadinamos branduolìnėmis jėgomìs.***



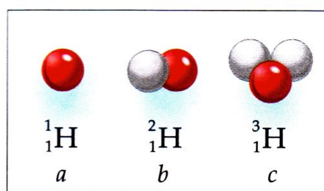
10.8.1 pav.

Branduolinės jėgos reiškiasi tik mažais, branduolio dydžio (10^{-15} m), atstumais. Tokiu atstumu jos yra 100 kartų didesnės už elektromagnetines jėgas. Be to, jėgos, kuriomis viena kitą traukia elektringosios dalelės ir elektros krūvio neturinčios dalelės, yra vienodos. Taigi dviejų protonų, dviejų neutronų ir protono bei neutrono tarpusavio traukos jėgos yra lygios. Branduolio nukleonų tarpusavio sąveika fizikoje vadinama ***stipriąją sąveika***.

Izotopai

Cheminio elemento atomų branduoliai, turintys tiek pat protonų, bet skirtingą skaičių neutronų, vadinami ***izotòpais*** (gr. *isos* – lygus, vienodas, panašus, *topos* – vieta). Tokie branduoliai priklauso tam pačiam elementui ir užima tą patį periodinės cheminių elementų lentelės langelį. Vadinasi, jų krūvis, taigi ir elektronų skaičius apvalkaluose, yra vienodas. Todėl cheminės izotopų savybės nesiskiria. Kadangi to paties elemento skirtingų izotopų branduoliai turi nevienodą skaičių neutronų, tai skiriasi tų izotopų masė, o dėl to – ir fizinės savybės.

Izotopai gali būti stabilūs ir nestabilūs (radioaktyvūs). Visi elementai, kurių $Z > 82$, neturi stabilių izotopų. Šiuo metu yra žinoma apie 300 stabilių ir apie 2000 nestabilių izotopų.



10.8.2 pav.

Izotopas žymimas cheminio elemento simboliu. Kairėje jo pusėje, viršuje, rašomas masės skaičius A, apačioje – protonų skaičius Z (^A_ZX). Pavyzdžiui, yra žinomi trys vandenilio izotopai. Jų atominė masė skiriasi du ir tris kartus, o branduolį sudaro vienas protonas. Lengviausias vandenilio izotopas žymimas ^1_1H (10.8.2 pav., *a*); izotopas, kurio atominė masė lygi 2, vadinamas dèuteriu (sunkiúoju vandeniliù) ir žymimas ^2_1H (arba ^2_1D; 10.8.2 pav., *b*); izotopas, kurio atominė masė lygi 3, vadinamas tričiù ir žymimas ^3_1H (arba ^3_1T; 10.8.2 pav., *c*).

Klausimai ir užduotys

1. Apibūdinkite protoninį-neutroninį atomo branduolio modelį.

2. Kokios jėgos veikia atomo branduolyje?

3. Kokia elementarioji dalelė buvo atrasta pirmiausia?

4. Užrašykite istorinę neutrono gavimo branduolinę reakciją.

5. Iš kokių dalelių susideda atomų branduoliai?

6. Kaip nustatoma, kiek protonų ir kiek neutronų yra atomo branduolyje?

7. Ką vadiname atomo branduolio masės skaičiumi? Kaip jį rasti?

8. Ką vadiname izotopu? Kokių būna izotopų?

9. Kuo skiriasi radioaktyviųjų ir neradioaktyviųjų elementų atomų branduolių sudėtis?

10. Kuo skiriasi deguonies izotopų $^{16}_8O$, $^{17}_8O$ ir $^{18}_8O$ branduoliai?

11. Kodėl to paties elemento skirtingų izotopų fizinės savybės skiriasi?

12. Kaip pakinta elemento eilės numeris, masės skaičius ir masė, kai branduolys išspinduliuoja:
a) protoną;
b) neutroną;
c) elektroną;
d) gama kvantą?

10.9. Atomo branduolio ryšio energija

Branduolio ryšio energijos samprata

Pagrindinės sąvokos

Bránduolio rỹšio enèrgija,
mãsės defèktas,
savitóji bránduolio rỹšio enèrgija.

Atomo branduolį sudarančios elementariosios dalelės – protonai ir neutronai – sąveikauja. Šią sąveiką pavadinome stipriąja. Žinome, kad būtent dėl jos branduoliai yra stabilūs. Branduolio nukleonų tarpusavio ryšys tiriamas energijos tvermės dėsniu pagrįstais metodais, pasitelkiant atomo branduolio ryšio energijos sąvoką. ***Víeno nukleòno rỹšio enèrgija*** branduolyje vadinamas fizikinis dydis, lygus darbui, kurį reikia atlikti norint pašalinti nukleoną iš branduolio ir nesuteikti jam kinetinės energijos. Tada visa atomo ***bránduolio rỹšio enèrgija*** nusakoma darbu, kurį reikia atlikti norint suskaldyti branduolį į pavienius nukleonus ir nesuteikti jiems kinetinės energijos.

Antra vertus, remdamiesi energijos tvermės dėsniu, galime teigti, kad, branduoliui susidarant iš nukleonų, turi išsiskirti tiek pat energijos, kiek jos reikėjo branduoliui suskaldyti į sudedamąsias dalis. Taigi branduolio ryšio energija lygi laisvųjų to branduolio nukleonų ir jame esančių nukleonų energijų skirtumui. Nagrinėjant branduolines reakcijas ir kitus branduolinius procesus, svarbu žinoti branduolio ryšio energijos vertę. Ji yra nepaprastai didelė. Pabandykime išsiaiškinti, kaip ją galima apskaičiuoti.

Teoriškai neįmanoma apskaičiuoti branduolio ryšio energijos, nes nežinoma branduolinių jėgų matematinė išraiška. Šiam tikslui buvo pasinaudota Einšteino masės ir energijos sąryšiu $E = mc^2$. Labai tiksliai išmatavus atomų branduolių masę, paaiškėjo, kad branduolio, turinčio Z protonų ir N neutronų, masė yra mažesnė už to paties skaičiaus laisvųjų protonų ir neutronų masių sumą:

$$m_{br} < Zm_p + Nm_n. \tag{10.7}$$

Tada galime parašyti:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{br}; \tag{10.8}$$

čia Δm – dydis, vadinamas branduolio ***mãsės defektù***.

Iš protonų ir neutronų susidarant branduoliui, bendra šių nukleonų masė sumažėja dėl to, kad išsiskiria ryšio energija, kuri išsisklaido aplinkoje. Ši energija išsiskiria nukleonų traukos jėgoms atliekant darbą. Vadinasi, galima teigti, kad energiją, išsiskiriančią branduoliui susidarant iš pavienių nukleonų, atitinka bendros jų masės sumažėjimas dydžiu Δm. Tada pagal Einšteino sąryšį dydis Δm gali būti atomo branduolio ryšio energijos matas:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_{\mathrm{r}}}{c^2}; \qquad (10.9)$$

čia ΔE_{r} – branduolio ryšio energija, c – šviesos greitis vakuume. Sujungę 10.8 ir 10.9 formules, gauname branduolio ryšio energijos išraišką:

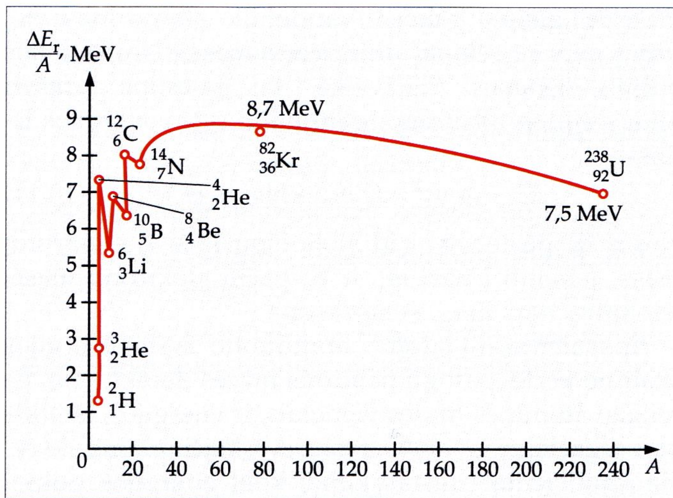
$$\Delta E_{\mathrm{r}} = \Delta m c^2 = (Zm_{\mathrm{p}} + Nm_{\mathrm{n}} - m_{\mathrm{br}})c^2. \qquad (10.10)$$

Atomo branduoliui suskaldyti į pavienius nukleonus reikia energijos, lygios branduolio ryšio energijai ΔE_{r}. Šiuo atveju energija naudojama darbui atlikti įveikiant branduolines jėgas (branduolio nukleonų traukos jėgas).

Savitoji branduolio ryšio energija

Svarbus informacijos apie atomo branduolio savybes šaltinis yra ***savitóji bránduolio rýšio enèrgija – branduolio ryšio energijos ΔE_r ir branduolį sudarančių nukleonų skaičiaus A santykis***. Ji rodo, kiek branduolio ryšio energijos tenka vienam nukleonui. Tiek energijos reikia vienam nukleonui pašalinti iš branduolio. Vadinasi, stabiliausi yra tie branduoliai, kurių savitoji ryšio energija yra didžiausia.

10.9.1 paveiksle pavaizduota, kaip savitoji atomų branduolių ryšio energija priklauso nuo jų masės skaičiaus. Matome, kad daugiausia savitosios ryšio energijos turi tie branduoliai, kurių masės skaičius A yra nuo 40 iki 100. Šioje srityje ji siekia apie 8,7 MeV. Lengvųjų branduolių savitoji ryšio energija maža. Branduolių masės skaičiui mažėjant nuo vertės $A = 30$, savitoji ryšio energija mažėja šuoliškai, o, didėjant nuo vertės $A = 100$, ji mažėja tolygiai. Iš to, kas pasakyta, išplaukia, kad, dalijantis sunkiesiems branduoliams ($A > 100$) arba jungiantis lengviesiems, susidaro stabilesni branduoliai. Vykstant tokioms



10.9.1 pav.

reakcijoms (grandininėms arba termobranduolinėms), išsiskiria labai daug energijos.

Atomo branduolio fizikoje susiduriama su labai didele branduolinių procesų ir juose dalyvaujančių elementariųjų dalelių energija, todėl ji paprastai matuojama ne įprastiniais vienetais – džauliais (J), bet *elektronvòltais* (žymima eV). Abu šie vienetai susiję taip:

$$1\ \text{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}.$$

Atomo fizikoje dažnai vartojami ir kartotiniai vienetai: *kiloelektronvòltas* (keV), *megaelektronvòltas* (MeV), *gigaelektronvòltas* (GeV), *teraelektronvòltas* (TeV). Su elektronvoltu jie susiję taip:

$$1\ \text{keV} = 10^3\ \text{eV}, \qquad 1\ \text{MeV} = 10^6\ \text{eV},$$
$$1\ \text{GeV} = 10^9\ \text{eV}, \qquad 1\ \text{TeV} = 10^{12}\ \text{eV}.$$

Atomo branduolio ryšio energijos apskaičiavimas

Praktiškai skaičiuojant atomo branduolio ryšio energiją, patogiau naudotis ne vadovėlio 194 puslapyje pateikta, bet kitokia 10.10 formulės išraiška. To priežastis paprasta. Masės spektrografu matuojant branduolio masę, iš tiesų nustatoma ne ji, o keletą kartų jonizuoto atomo masė. Todėl visi galutiniai duomenys gaunami atsižvelgiant ne į branduolio masę m_{br}, o į neutralaus atomo masę m_a. Vadinasi, vietoj branduolio masės m_{br} galima imti atominę masę m_a, išreikštą atominės masės vienetais. Tada protono

masę m_p galima pakeisti vandenilio atomo mase m_H ($m_H = m_p + m_e$; čia m_e – elektrono masė), išreikšta tais pačiais vienetais. Atsižvelgę į tai, galėsime parašyti tokią vandenilio atomo branduolio ryšio energijos išraišką:

$$\Delta E_r = \Delta mc^2 = (Zm_H + Nm_n - m_a)c^2. \qquad (10.11)$$

Nesunku pastebėti, kad šioje išraiškoje Z elektronų masė, įeinanti į narį m_a, ir tų pačių elektronų masė, įeinanti į narį Zm_H, susiprastina.

Apskaičiuojant atomo branduolio ryšio energijos skaitinę vertę, patogu naudotis masės defekto Δm, išreikšto atominės masės vienetais, ir energijos, išreikštos megaelektronvoltais, ryšiu. Apskaičiuokime šio ryšio koeficientą (nustatykime, kokį energijos pokytį atitinka masės defektas, lygus 1 u). Iš 10.9 lygties išreiškiame energijos pokytį:

$$\Delta E_r = \Delta mc^2.$$

Kai $\Delta m = 1$ u $= 1{,}660 \cdot 10^{-27}$ kg, o $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s, tai

$$\Delta E_r \approx 1{,}660 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} \cdot (3 \cdot 10^8\ \text{m/s})^2 \approx 1{,}492 \cdot 10^{-10}\ \text{J}.$$

Žinodami, kad 1 eV $= 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J, atomo branduolio ryšio energiją išreiškiame megaelektronvoltais:

$$\Delta E_r = \frac{1\ \text{eV} \cdot 1{,}492 \cdot 10^{-10}\ \text{J}}{1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}} \approx 931{,}5 \cdot 10^6\ \text{eV} \approx 931{,}5\ \text{MeV}.$$

Matome: kai branduolinio proceso metu masės defektas Δm pakinta 1 u, išsiskiria arba sugeriama 931,5 MeV energijos. Ši energijos vertė ir lygi ieškomajam masės defekto ir energijos ryšio koeficientui (1 u atitinka 931,5 MeV).

Taigi, norėdami apskaičiuoti atomo branduolio ryšio energiją ΔE_r, išreikštą megaelektronvoltais, turime branduolį sudarančių dalelių bendros masės ir branduolio masės skirtumą Δm, išreikštą atominės masės vienetais, padauginti iš 931,5 $\frac{\text{MeV}}{\text{u}}$:

$$\Delta E_r = \Delta m \cdot 931{,}5\ \frac{\text{MeV}}{\text{u}}.$$

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname atomo branduolio masės defektu?

2. Kas yra branduolio ryšio energija? Kaip ji nustatoma?

3. Ką vadiname savitąja atomo branduolio ryšio energija?

4. Kieno masė didesnė: atomo branduolio dalelių ar laisvųjų dalelių, iš kurių jis susideda?

5. Kaip susiję šie matavimo vienetai: 1 u ir 1 kg?

6. Protono, neutrono ir elektrono masę išreikškite atominės masės vienetais.

7. Remdamiesi Einšteino masės ir energijos sąryšiu, nustatykite, kokią energiją megaelektronvoltais atitinka 1 u.

8. Apskaičiuokite vandenilio izotopo $^{2}_{1}H$ branduolio masės defektą. (≈ 0,0024 u)

9. Kokia yra ličio $^{7}_{3}Li$ branduolio ryšio energija? ($6,2 \cdot 10^{-12}$ J)

10. Nustatykite šių branduolių savitąją ryšio energiją:

a) deguonies $^{16}_{8}O$; (7,57 MeV)

b) kalcio $^{40}_{20}Ca$. (8,55 MeV)

11. Kiek mažiausiai energijos reikia azoto $^{14}_{7}N$ branduoliui suskaldyti į protonus ir neutronus? (105 MeV)

10.10. Branduolinės reakcijos

Branduolinės reakcijos samprata

Pagrindinės sąvokos

Branduolìnė reãkcija,
egzotèrminė branduolìnė reãkcija,
endotèrminė branduolìnė reãkcija,
branduolìnės reãkcijos enèrgija.

Branduolinės reakcijos paprastai sukeliamos apšaudant sunkiuosius branduolius elementariosiomis dalelėmis arba lengvaisiais branduoliais. Reakcija vyksta tada, kai elementariosios dalelės (arba lengvieji branduoliai) turi pakankamai kinetinės energijos, kad galėtų įsiskverbti į branduolio stipriosios sąveikos veikimo sritį. Tiek energijos dalelėms ir lengviesiems branduoliams galima suteikti elementariųjų dalelių greitintuvais. Juose dalelės įgyja gerokai daugiau energijos, negu išlėkdamos iš medžiagos, skleidžiančios jonizuojančiąją spinduliuotę. ***Branduolinè reãkci-***

ja vadinamas elementų atomų branduolių, sąveikaujančių su elementariosiomis dalelėmis arba tarp savęs, virsmas. Apskritai branduolinės reakcijos gali būti sukeliamos šiomis priemonėmis:

1) greitintuvais (dalelėms suteikiama iki 10^5 MeV energijos);

2) branduoliniais reaktoriais (jie yra neutronų šaltiniai);

3) radioaktyviąja α ir γ spinduliuote (jos energija siekia iki 10 MeV);

4) kosmine spinduliuote, kurioje aptinkama labai daug energijos turinčių elementariųjų dalelių (tačiau kosminės spinduliuotės sukeltos branduolinės reakcijos vyksta retai ir jas sunku kontroliuoti).

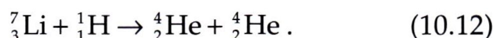
Bendrąją branduolinės reakcijos schemą simboliais galima užrašyti taip:



$$X + a \rightarrow Y + b;$$

čia X – pirminis branduolys, a – veiklioji dalelė, sukelianti branduolinę reakciją, Y – antrinis branduolys, b – antrinė dalelė.

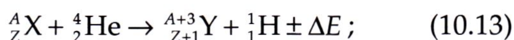
Prisiminkime, kad pirmąją dirbtinę branduolinę reakciją, kurios metu buvo atrastas protonas, 1919 m. sukėlė anglų fizikas Ernestas Rezerfordas. Šią reakciją nagrinėjome 10.8 temoje. Ten pat buvo pateikta ir kita istorinė branduolinė reakcija, leidusi aptikti neutroną. 1932 m., greitintuvu pagreitinus protonus, buvo suskaldyti ličio branduoliai:



$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + ^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{4}_{2}\mathrm{He}. \quad (10.12)$$

Ypač svarbus įvykis, turėjęs didelę įtaką branduolinių reakcijų sukėlimui, tyrimui ir taikymui praktikoje, buvo neutrono atradimas. Kadangi neutronas neturi elektros krūvio, jo sąveika su atomų branduoliais yra kitokio pobūdžio negu elektringųjų dalelių. Neutronai lengvai įsiskverbia į atomų branduolius (jų sugeriami) ir sukelia jų virsmus.

Vykstant branduolinėms reakcijoms, galioja elektros krūvio, masės skaičiaus, energijos, judesio kiekio ir kiti tvermės dėsniai. Pavyzdžiui, visas branduolines reakcijas, kurios sukeliamos branduolius veikiant α dalelėmis (helio atomų branduoliais), galima išreikšti tokia lygtimi:



$$^{A}_{Z}\mathrm{X} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{A+3}_{Z+1}\mathrm{Y} + ^{1}_{1}\mathrm{H} \pm \Delta E; \quad (10.13)$$

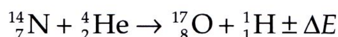
čia $^{A}_{Z}\mathrm{X}$ – pirminis branduolys, apšaudomas α dalele ($^{4}_{2}\mathrm{He}$), $^{A+3}_{Z+1}\mathrm{Y}$ – antrinis branduolys, susidaręs po reakcijos, $^{1}_{1}\mathrm{H}$ – antrinė dalelė (protonas), ΔE – išsiskyrusi (sugertoji) energija.

Branduolinės reakcijos energija

Kiekvieną branduolinę reakciją apibūdina jos energijos pobūdis. Vykstant vienoms reakcijoms, energija sugeriama, o vykstant kitoms – išsiskiria. Todėl simbolinėje lygtyje (10.13) dydis ΔE gali įgyti tiek teigiamas ($\Delta E > 0$), tiek neigiamas ($\Delta E < 0$) vertes. Kai $\Delta E > 0$, branduolinė reakcija vadinama ***egzotèrmine*** (*energija išsiskiria*), kai $\Delta E < 0$ – ***endotèrmine***[1] (*energija sugeriama*).

Branduolinės reakcijos metu vieni branduoliai virsta kitais, taigi kartu pakinta ir jų ryšio energija. Dėl to turi pakisti ir reakcijoje dalyvaujančių dalelių rimties energijų suma. Branduolio rimties energija ($m_{\mathrm{br}}c^2$) tiesiogiai susijusi su jo ryšio energija ΔE_{r} (žr. 10.10 formulę). Vadinasi, taikant masės ir energijos tvermės dėsnius, ***branduolìnės reãkcijos enèrgiją*** galima apskaičiuoti taip pat kaip ir branduolio ryšio energiją. Tereikia palyginti branduolių ir elementariųjų dalelių (dalyvaujančių reakcijoje) rimties energiją prieš reakciją ir po jos. Iliustruokime šį teiginį konkrečiais pavyzdžiais.

Apskaičiuokime Rezerfordo sukeltos branduolinės reakcijos



$$^{14}_{7}\mathrm{N} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{17}_{8}\mathrm{O} + ^{1}_{1}\mathrm{H} \pm \Delta E$$

energiją. Pritaikę šiai reakcijai 10.10 ir 10.13 formules, sudarome tokią lygtį:

$$\left(m\left(^{14}_{7}\mathrm{N}\right) + m\left(^{4}_{2}\mathrm{He}\right)\right)c^2 =$$
$$= \left(m\left(^{17}_{8}\mathrm{O}\right) + m\left(^{1}_{1}\mathrm{H}\right)\right)c^2 + \Delta E. \qquad (10.14)$$

Apskaičiuojame kairiojoje lygties pusėje parašytų (t. y. reakcijoje dalyvaujančių) elementų branduolių visą masę, išreikštą atominės masės vienetais. Ją sudaro azoto branduolio masė, kuri lygi 14,003074 u, ir α dalelės masė, lygi 4,002603 u. Jų suma lygi 18,005677 u. Panašiai randame ir dešiniojoje lygties pusėje parašytų elementų branduolių (reakcijos pro-

[1] Žodis „egzoterminis" (gr. *exō* – išorėje, *thermos* – šiltas, karštas) reiškia atiduodantį šilumą, o „endoterminis" (gr. *endon* – viduje, *thermos* – šiltas, karštas) – sugeriantį šilumą.

duktų) masių sumą. Deguonies izotopo branduolio masė lygi 16,999133 u, o protono – 1,007825 u, taigi jų masių suma yra 18,006958 u. Matome, kad elementų branduolių masių suma po reakcijos yra didesnė negu prieš reakciją. Masių skirtumas lygus

$$\Delta m = 0{,}001281 \text{ u}.$$

Remdamiesi 10.14 lygtimi, apskaičiuojame branduolinės reakcijos energiją:

$$\Delta E = -0{,}001281 \text{ u} \cdot 931{,}5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} = -1{,}19 \text{ MeV}.$$

Vadinasi, nagrinėjama branduolinė reakcija yra endoterminė. Kad ji vyktų, sistemai ($^{14}_{7}\text{N} + ^{4}_{2}\text{He}$) reikia suteikti mažiausiai 1,19 MeV energijos. Ši energija gali būti pirminės α dalelės kinetinė energija. Kitaip tariant, valdydami pirminės elementariosios dalelės kinetinę energiją, galime valdyti ir branduolinę reakciją.

Apskaičiuokime branduolinės reakcijos, išreikštos 10.12 lygtimi, energiją. Sudėję kairiosios lygties pusės elementų branduolių mases, gauname:

$$m(^{7}_{3}\text{Li}) + m(^{1}_{1}\text{H}) = 7{,}016005 \text{ u} + 1{,}007825 \text{ u} = \\ = 8{,}023830 \text{ u}.$$

Panašiai apskaičiuojame po reakcijos susidariusių elementų branduolių masių sumą:

$$2m(^{4}_{2}\text{He}) = 2 \cdot 4{,}002603 \text{ u} = 8{,}005206 \text{ u}.$$

Akivaizdu, kad branduolių masių suma prieš reakciją yra didesnė negu po reakcijos, taigi masių skirtumas lygus $\Delta m = 0{,}018624$ u. 10.12 lygties energiją apskaičiuojame panašiai kaip ir 10.14 lygties. Gauname:

$$\Delta E = 17{,}33 \text{ MeV}.$$

Nagrinėjama branduolinė reakcija yra egzoterminė. Jai vykstant, energija išsiskiria. Ta energija yra po reakcijos susidariusių helio atomų branduolių kinetinė energija.

Apibendrindami galime padaryti tokią išvadą: ***elementų branduolių ir elementariųjų dalelių rimties energijų prieš reakciją ir po jos skirtumas lygus branduolinės reakcijos energijai.*** Antra vertus, ***reakcijoje dalyvaujančių dalelių kinetinės energijos pokytis taip pat nusako branduolinės reakcijos energiją.***

Klausimai ir užduotys

1. Koks procesas vadinamas branduoline reakcija?

2. Kaip galima sukelti branduolines reakcijas?

3. Kokie tvermės dėsniai galioja vykstant branduolinėms reakcijoms?

4. Kas vadinama branduolinės reakcijos energija?

5. Kuo iš esmės skiriasi neutronų sukeltos branduolinės reakcijos nuo reakcijų, kurias sužadina elektringosios dalelės?

6. Vykstant tam tikrai reakcijai, išsiskiria energija. Palyginkite reakcijos produktų ir joje dalyvaujančių dalelių masę (padidėja ji ar sumažėja).

7. Apšaudant boro $^{11}_{5}B$ branduolius protonais, susidaro berilis $^{8}_{4}Be$. Kokių dar branduolių atsiranda per šią reakciją? Kiek energijos tuo metu išsiskiria?

8. Švitinant azoto izotopą $^{15}_{7}N$ protonais, susidaro anglis ir alfa dalelė. Kad ši reakcija vyktų, protonas turi turėti 1,2 MeV energijos. Apskaičiuokite branduolinės reakcijos energiją.

9. Rimties būsenos kadmio branduolys sugeria neutroną, kurio energija 10^{-15} J. Apskaičiuokite naujo susidariusio branduolio greitį. (10^4 m/s)

10. Kiek energijos išsiskiria skylant neutronui? (0,77 MeV)

10.11. Grandininės branduolinės reakcijos

Pagrindinės sąvokos

Grandìninė branduolìnė reãkcija, krìtinė mãsė, neutrònų daugéjimo koeficieñtas.

Urano branduolio dalijimosi mechanizmas

Branduolinės reakcijos esti įvairios. Svarbios kai kurių sunkiųjų branduolių dalijimosi reakcijos, nes, joms vykstant, išsiskiria milžiniškas kiekis energijos. Antai, dalijantis kiekvienam urano branduoliui,


Otas Hanas

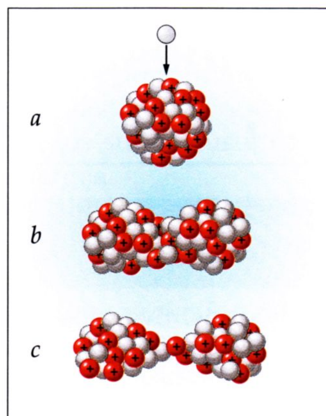

Lizė Meitner

išsiskiria apie 200 MeV[1], o dalijantis visiems 1 g urano esantiems branduoliams – $2{,}3 \cdot 10^4$ kWh[2] energijos. Tiek pat jos gaunama sudeginus 2,5 t naftos arba 3 t anglių. Šie pavyzdžiai rodo, kad atomo branduolyje slypi milžiniški energijos ištekliai. Nenuostabu, kad ilgai ieškota būdų, kaip gauti didelius kiekius branduolinės energijos, kaip ją panaudoti praktiniams tikslams.

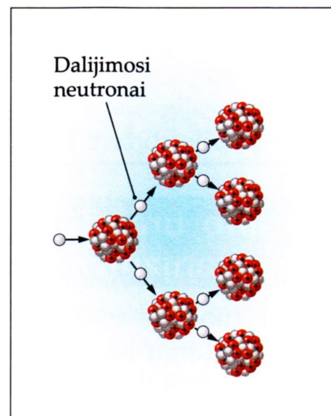
1938 m. vokiečių mokslininkams Otui Hanui (*Otto Hahn*, 1879–1968) ir Fricui Štrasmanui (*Fritz Strassmann*, 1902–1980) pavyko, apšaudant uraną neutronais, gauti periodinės sistemos vidurinės dalies elementus: kriptoną, barį ir kt. 1939 m. anglų fizikas Otas Frišas (*Otto Frisch*, 1904–1979) ir austrų fizikė Lizė Meitner (*Lise Meitner*, 1878–1968) paaiškino, kaip dalijasi urano branduolys.

Atomo branduolio dalijimasis aiškinamas remiantis lašėliniu bránduolio mòdeliu. Pagal jį branduolį sudarančių nukleonų debesėlis yra panašus į įelektrinto skysčio lašelį (10.11.1 pav., *a*), kuris yra rutulio formos. Debesėlyje tarp nukleonų veikia branduolinės traukos ir elektrostatinės stūmos jėgos. Šių jėgų pusiausvyra neleidžia branduoliui suirti. Sugėręs neutroną, urano atomo branduolys susižadina ir pradeda deformuotis (10.11.1 pav., *b*). Jėgų pusiausvyra sutrinka – stūmos jėgos tarp ištęsto branduolio galų pasidaro didesnės už kaklelyje veikiančias traukos jėgas (10.11.1 pav., *c*). Dėl to branduolys sprogsta į skeveldras, kurių greitis siekia $\frac{1}{30}$ šviesos greičio. Dalijantis urano branduoliui, kartu su skeveldromis išspinduliuojami 2–3 laisvieji neutronai.

10.11.1 pav.



10.11.2 pav.



[1] Primename, kad 1 eV = $= 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J.

[2] Primename, kad 1 kWh = = 3 600 000 J.

Grandininės branduolinės reakcijos samprata

Palankiomis sąlygomis urano branduolio skilimo metu atsiradę neutronai gali patekti į kitus urano branduolius ir juos padalyti. Iš jų išlėkę neutronai padalija dar kitus branduolius ir t. t. Dėl to besidalijančių branduolių skaičius greitai didėja, kyla grandininė branduolinė reakcija (10.11.2 pav.). ***Grandinine branduolinė reakcija vadinama savaime besiplečianti branduolinė reakcija, kurią palaiko jos pačios produktai.***

Urano izotopai

Atrodo, grandininės branduolinės reakcijos modelis yra gana paprastas. Tačiau iš tiesų viskas vyksta gerokai sudėtingiau. Branduolinės reakcijos metu atsiradę neutronai gali suskaldyti ne visus urano branduolius. Žinomi septyni urano izotopai: $^{233}_{92}U$, $^{234}_{92}U$, $^{235}_{92}U$, $^{236}_{92}U$, $^{237}_{92}U$, $^{238}_{92}U$, $^{239}_{92}U$. Gamtoje aptinkami tik du urano izotopai: $^{235}_{92}U$ ir $^{238}_{92}U$, kiti gaunami dirbtiniu būdu. Gamtoje randami urano izotopai naudojami grandininėse reakcijose.

Gamtinis uranas sudarytas daugiausia iš izotopo $^{238}_{92}U$. Jo čia yra net 99,3 %. Tačiau per branduolinę reakciją atsiradusių neutronų energijos nepakanka šio izotopo branduoliams suskaldyti. Urano $^{238}_{92}U$ dalijimąsi gali sukelti apytiksliai vienas iš penkių neutronų. Neutronai, kurie išlekia iš besidalijančių urano branduolių, geba suskaldyti tik urano izotopo $^{235}_{92}U$ branduolius, o jo gamtiniame urane yra vos 0,7 %. Vadinasi, norint sukelti grandininę dalijimosi reakciją, reikia atskirti urano izotopus $^{238}_{92}U$ ir $^{235}_{92}U$ ir gauti didelį kiekį gryno izotopo $^{235}_{92}U$.

Kritinė masė

Būtina grandininės reakcijos sąlyga – pakankamas kiekis urano. Jei bandinyje jo atomų bus mažai, dauguma neutronų pralėks nepataikydami nė į vieną branduolį. Mat medžiaga, kaip ir pavienis atomas, sudaryta daugiausia iš tuštumos. Todėl tikimybė neutronui susidurti su mažais tuštumoje esančiais bran-

duoliais bus labai menka. Mažiausia urano masė, kuriai esant dar gali vykti grandininė reakcija, vadinama ***krìtine masè***. Rutulio formos gryno urano $^{235}_{92}U$ gabalo kritinė masė lygi maždaug 50 kg. Tokio rutulio spindulio ilgis – apie 9 cm. Tam tikromis sąlygomis kritinę urano masę galima sumažinti. Apie tai plačiau kalbėsime kitoje temoje.

Neutronų daugėjimo koeficientas

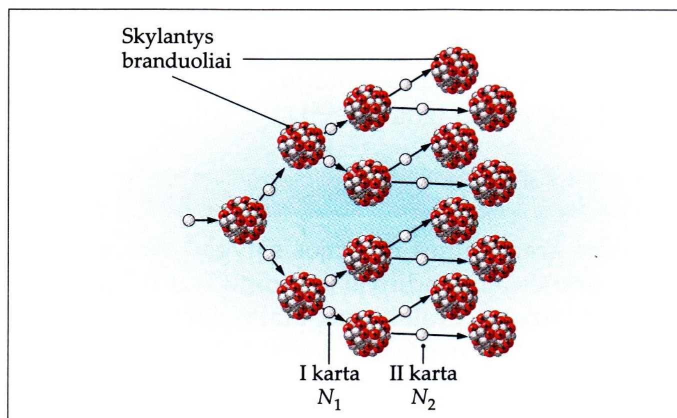
Kad vyktų grandininė reakcija, į branduolius turi pataikyti reikiamas skaičius neutronų. Šią sąlygą apibūdina fizikinis dydis, vadinamas ***neutrònų daugéjimo koeficientù***. Jis žymimas raide k. Neutronų daugėjimo koeficientas lygus kurios nors kartos („jaunosios“) neutronų skaičiaus N_2 ir juos išlaisvinusios kartos („senosios“) neutronų skaičiaus N_1 santykiui (10.11.3 pav.):

$$k = \frac{N_2}{N_1}. \qquad (10.15)$$

Koeficientą k lemia šie veiksniai:

- neutronų patekimas iš reakcijos medžiagos į aplinką;
- neutronų patekimas į konstrukcinius įrenginio elementus;
- lėtuosius neutronus sugėrusio urano izotopo $^{235}_{92}U$ branduolių dalijimasis arba greituosius neutronus pasiglemžusių izotopų $^{235}_{92}U$ ir $^{238}_{92}U$ branduolių dalijimasis;
- neutronus pagavusių izotopų $^{235}_{92}U$ ir $^{238}_{92}U$ branduolių nesidalijimas.

10.11.3 pav.



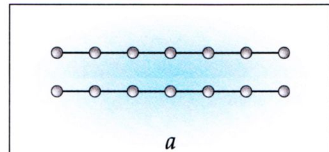
Iš neutronų daugėjimo koeficiento skaitinės vertės galima spręsti apie grandininę branduolinę reakciją. Kai $k > 1$, neutronų ilgainiui daugėja arba jų skaičius būna pastovus – grandininė reakcija vyksta. Kai $k < 1$, neutronų mažėja ir grandininė reakcija nevyksta. Pastovią grandininę reakciją galima gauti tada, kai neutronų daugėjimo koeficientas lygus vienetui. Šios sąlygos būtina laikytis, nes, kai $k = 1{,}01$, jau įvyksta sprogimas.

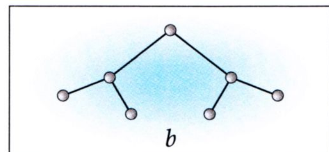
Klausimai ir užduotys

1. Kuo skiriasi gamtoje aptinkamų urano izotopų $^{235}_{92}U$ ir $^{238}_{92}U$ fizinės savybės?

2. Ką vadiname neutronų daugėjimo koeficientu? Kas jį lemia?

3. 10.11.4 paveiksle pavaizduotos neutronų daugėjimo grandininėse branduolinėse reakcijose schemos. Kiekvienu atveju apskaičiuokite neutronų daugėjimo koeficientą.





10.11.4 pav.

4. Yra žinoma, kad, vienam $^{235}_{92}U$ branduoliui dalijantis į dvi skeveldras, išsiskiria apie 200 MeV energijos. Apskaičiuokite:

a) kiek energijos išsiskiria branduoliniame reaktoriuje iš 1 g urano; (23 MWh)

b) kiek akmens anglių reikia sudeginti norint gauti tiek pat energijos. (2,8 t)

5. Kodėl, skylant urano branduoliui, atsiranda laisvųjų neutronų?

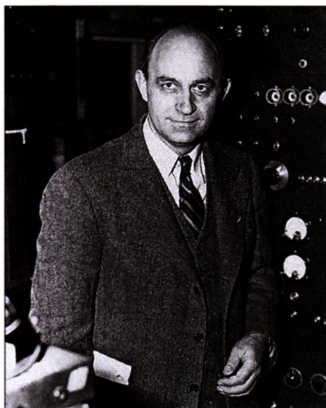
10.12. Branduolinis reaktorius

Pagrindinės sąvokos

Branduolìnis reãktorius,
reãktoriaus aktyvióji zonà,
lėtìklis,
sunkùsis vanduõ.

Branduolinio reaktoriaus sandara

Valdomosios grandininės branduolinės reakcijos vyksta įrenginiuose, kurie vadinami ***branduolìniais reãktoriais***. Vienas iš jų šiuo metu veikia Ignalìnos atominėje elektrinėje (10.12.1 pav.). Pirmasis pasaulyje branduolinis reaktorius buvo paleistas 1942 m.


Enrikas Fermis

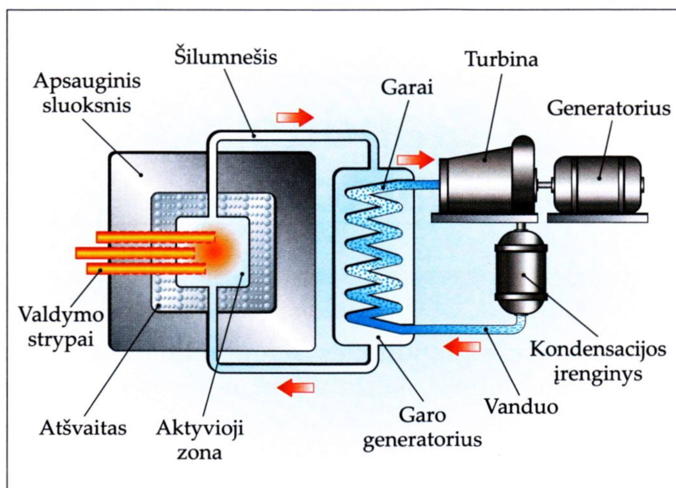

10.12.1 pav.

gruodžio 2 d. Čikãgos universiteto sporto salėje. Reaktoriaus paleidimui vadovavo italų fizikas Nobelio premijos laureatas Enrikas Fermis (*Enrico Fermi*, 1901–1954). Šio reaktoriaus galia siekė tik 0,5 W. Tačiau svarbu tai, kad jame buvo įvykdyta pirmoji valdoma grandininė branduolinė reakcija. Pirmoji pasaulyje eksperimentinė atominė elektrinė pastatyta 1954 m. Òbninske (netoli Maskvõs), o pirmoji pramoninė atominė elektrinė – 1956 m. Kalder Hãlyje (Kámbrijos grafỹstė, Didžióji Britãnija).

Svarbiausia atominės elektrinės (10.12.2 pav.) dalis – branduolinis reaktorius. Pagrindiniai jo elementai yra branduolinis kuras ($^{235}_{92}U$, $^{238}_{92}U$, $^{239}_{94}Pu$), neutronų lėtiklis (sunkusis arba paprastas vanduo, grafitas), šilumnešis (vanduo, skystasis natris ir kt.).

Pagrindinė branduolinio reaktoriaus dalis yra aktyvioji zona – erdvė, kurioje vyksta grandininės reakcijos. Kad kuo mažiau neutronų nutekėtų, reaktoriaus aktyvioji zona apgaubiama neutronų atšvaitu, kuris didelę dalį išlekiančių neutronų grąžina į aktyviąją zoną. Neutronų atšvaitai dažniausiai gaminami iš grafito plokščių. Jie labai sumažina branduolinio kuro kritinę masę. Į reaktoriaus aktyviąją zoną įkišami valdymo strypai, turintys kadmio arba boro. Valdymo strypai reguliuoja branduolinių reakcijų greitį. Branduolinis reaktorius padengiamas storu (iki 3 m) apsauginiu betono (su armatūra) sluoksniu. Jis saugo aplinką nuo neutronų ir gama spindulių, kurie išsiskiria veikiant branduoliniam reaktoriui.

10.12.2 pav.

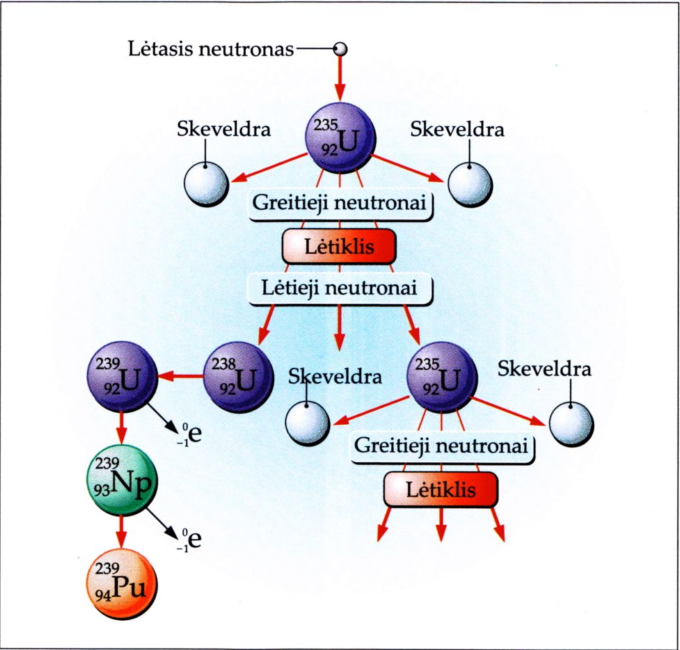


Branduolinio reaktoriaus veikimas

Pirma aptarkime, kas vyksta branduoliniame reaktoriuje. Žinome, kad neutronai, išlėkę iš savaime besidalijančio urano ($^{235}_{92}U$), juda dideliais greičiais. Greitieji neutronai (jų energija didesnė kaip 10 keV) turi nedaug galimybių patekti į gretimus urano ($^{235}_{92}U$) branduolius ir sukelti grandininę branduolinę reakciją. Lėtiesiems neutronams (jų energija yra iki 10 keV) tai pavyksta. Lėtųjų neutronų greitis artimas šiluminio judėjimo greičiui ($2 \cdot 10^3$ m/s). Branduoliniuose reaktoriuose greitiesiems neutronams lėtinti naudojami ***lėtìkliai***. Jų atomų branduolių masė turi būti palyginti nedidelė, nes, susidurdamas su lengvuoju branduoliu, neutronas praranda daugiau energijos negu atsitrenkdamas į sunkųjį.

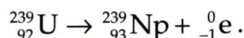
Neutronus gerai lėtina ***sunkùsis vanduõ***. Jis susidaro jungiantis vandenilio izotopui deuteriui (jo atominė masė lygi 2) su deguonimi. Fizinės sunkiojo ir paprasto vandens savybės skiriasi. Sunkusis vanduo užverda sušilęs iki 101,2 °C, o užšąla 3,8 °C temperatūroje. Geras neutronų lėtiklis yra ir grafitas. Neutronų lėtikliais apgaubiamos kuro kasetės.

Lėtuosius neutronus sugeria urano izotopo $^{238}_{92}U$ branduoliai (10.12.3 pav.). Susidaro radioaktyvusis



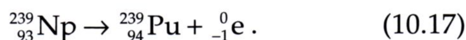
10.12.3 pav.

izotopas $^{239}_{92}U$, kurio pusėjimo trukmė 23 min. Jam skylant, gaunamas neptūnis:



$$^{239}_{92}U \rightarrow\, ^{239}_{93}Np + \,^{0}_{-1}e\,.$$

Neptūnis taip pat yra radioaktyvus. Jo pusėjimo trukmė – maždaug 2 dienos. Skylant neptūniui, susidaro plutonis:



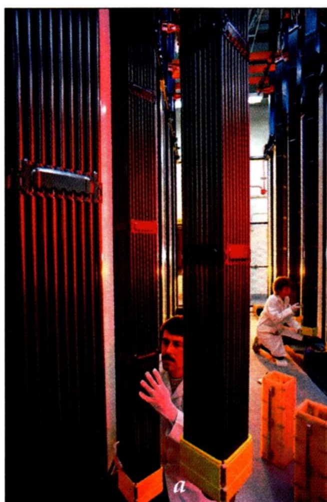
$$^{239}_{93}Np \rightarrow\, ^{239}_{94}Pu + \,^{0}_{-1}e\,. \qquad (10.17)$$

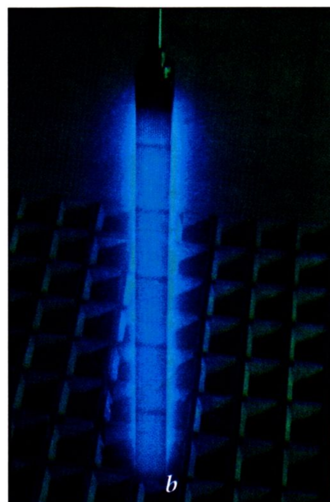
Šis elementas yra palyginti stabilus, nes jo pusėjimo trukmė – apie 24 000 metų. Plutonis, kaip ir urano izotopas $^{235}_{92}U$, skyla veikiamas lėtųjų neutronų.

Branduoliniame reaktoriuje energija gaunama branduolinio kuro kasetėse (10.12.4 pav., *a* ir *b*). Jos įdedamos į siaurus nerūdijančio plieno vamzdelius, o šie įstatomi į aktyviąją reaktoriaus zoną. Branduolinio kuro kasetės gaminamos iš urano oksido, kuris turi 97 % urano $^{238}_{92}U$ ir 3 % $^{235}_{92}U$. Skylantys $^{235}_{92}U$ branduoliai ir yra šiose kasetėse gaminamos energijos šaltinis. Veikiančiame reaktoriuje išsiskiriančią energiją perneša šilumnešis. Dažniausiai tai būna paprastas vanduo. Cirkuliuodamas specialiais kanalais, didelio slėgio ir aukštos temperatūros (apie 700 °C) šilumnešis perduoda šilumą antrojo kontūro vandeniui, kurio garai suka turbiną, o ši – elektrinės generatorių (10.12.2 pav.).

Reaktorius valdomas strypais, kurie įstumiami į aktyviąją zoną. Prieš paleidžiant branduolinį reaktorių, valdymo strypai į aktyviąją zoną įkišami iki galo. Visiškai sugerdami neutronus, jie neleidžia prasidėti

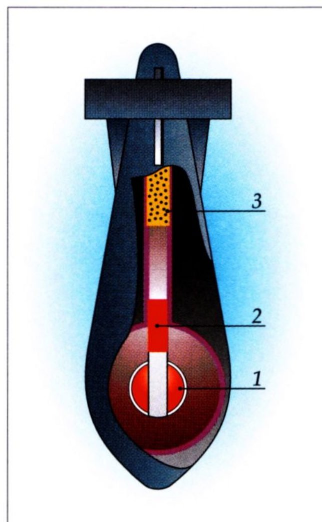
10.12.4 pav.





grandininei reakcijai. Paleidžiant reaktorių, strypai iš lėto traukiami iš aktyviosios zonos. Kai reaktoriaus galia padidėja virš nustatyto lygio, automatinė sistema įstumia valdymo strypus giliau į aktyviąją zoną.

Šiuo metu pasaulyje yra 31 branduolinė valstybė, eksploatuojanti 438 reaktorius. Lietuvà šiame sąraše vis dar minima kaip šalis, didžiausią suvartojamos energijos dalį pagaminanti branduolinėje jėgainėje. Ignalìnos atominėje elektrinėje veikė du RBMK-1500 tipo reaktoriai, kurių pirmasis pradėtas eksploatuoti 1983 m. gruodį, o antrasis – 1987 m. rugpjūtį. Šiuo metu veikia tik antrasis reaktorius, pirmasis uždarytas. Antrąjį Ignalìnos AE reaktorių numatyta uždaryti 2009 m. pabaigoje. Ignalìnos atominėje elektrinėje esantys RBMK tipo reaktoriai yra senosios kartos, dabar gaminami daug tobulesni ir saugesni. Tai – greitųjų neutronų reaktoriai, aušinami dujomis (GFR), skystuoju metalu (LFR), skystuoju natriu (SFR), išlydytos druskos reaktoriai (MSR) ir kt.



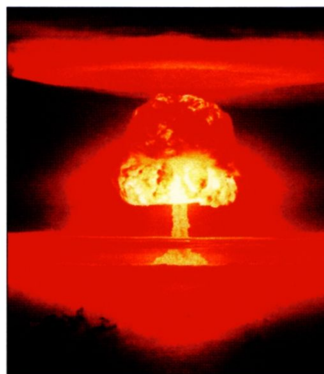
10.12.5 pav.

Nevaldomosios branduolinės reakcijos

Grandininės branduolinės reakcijos naudojamos ne tik taikiems tikslams. Nevaldomosios grandininės reakcijos vyksta sprogstant atominėms bomboms. Pirmoji atominė bomba buvo susprogdinta 1945 m. Niū Mèksiko dykumoje. Sprogimo metu išsiskyrė tiek energijos, kad išsilydė plieno bokštas, kuriame buvo įtaisyta bomba, ir dykumos slėnis. Po mėnesio atominės bombos sprogimas Japònijoje sunaikino tūkstančius žmonių.

Atominės bombos sandara nesudėtinga. Bombos viduje (10.12.5 pav.) yra du urano gabalai *1*, perskirti pleišto 2. Kiekvieno gabalo masė mažesnė už kritinę. Kai bombos sprogdinimo įtaisas *3* išmuša pleištą, urano gabalai susijungia ir jų masė viršija kritinę. Prasideda nevaldoma grandininė branduolinė reakcija, sukelianti sprogimą (10.12.6 pav.).

10.12.6 pav.



Manoma, kad atominės bombos sukūrimas paveikė žmonijos istoriją. Šis įvykis prilyginamas ugnies išgavimui senovėje. Panaudojus atominę bombą, pasaulyje prasidėjo ginklavimosi varžybos, šaltasis karas. Atominių bombų turi Kìnija, Didžióji Britãnija, Rùsija, Pakistãnas, JAV, Prancūzijà, Ìndija.

Klausimai ir užduotys

1. Išvardykite pagrindines branduolinio reaktoriaus dalis, nurodykite svarbiausias jų funkcijas.

2. Išvardykite pagrindines atominės elektrinės dalis, nurodykite jų funkcijas.

3. Kokią įtaką neutronų daugėjimo koeficientui turi reaktoriaus aktyviosios zonos matmenų didinimas; mažinimas? Atsakymą pagrįskite.

4. Atominė elektrinė per parą suvartoja 220 g urano izotopo $^{235}_{92}U$. Elektrinės naudingumo koeficientas 25 %. Atsižvelgdami į tai, kad, dalijantis vienam urano izotopui, išsiskiria 200 MeV energijos, apskaičiuokite atominės elektrinės galią. (53 MW)

5. Mokydamiesi šią temą, sužinojote, kad urano izotopo $^{235}_{92}U$ branduoliai po kelių aktyvių skilimų virsta plutonio $^{239}_{94}Pu$ branduoliais (10.12.3 pav.). Atominės elektrinės branduoliniame reaktoriuje per parą susidaro $3{,}9 \cdot 10^{-4}$ kg urano. Kiekvieno skilimo metu išsiskiria 170 MeV energijos. Apskaičiuokite branduolinio reaktoriaus galią. (320 kW)

6. Vykstant grandininei branduolinei reakcijai, pasidalija 0,1 % branduolių. Apskaičiuokite, kiek energijos išskiria 2 kg urano $^{235}_{92}U$. (164 GJ)

10.13. Termobranduolinės reakcijos

Pagrindinės sąvokos

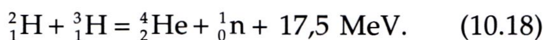
Termobranduol̀inė reãkcija.

Termobranduolinės reakcijos samprata

Nagrinėdami branduolines reakcijas, sužinojote, kad branduolinė energija išsiskiria dalijantis sunkiesiems branduoliams. Tačiau tai ne vienintelis branduolinės energijos gavimo būdas. Ji išsiskiria ir jungiantis lengviesiems, pavyzdžiui, vandenilio ar jo izotopų, branduoliams. Aukštos temperatūros sąlygomis vykstančios lengvųjų branduolių jungimosi (sintezės) reakcijos vadinamos ***termobranduolinėmis***

reãkcijomis. Termobranduolinėse reakcijose išsiskiria didesnė savitoji energija (t. y. energija, tenkanti vienam nukleonui) negu grandininėse dalijimosi reakcijose. Pavyzdžiui, deuteriui (sunkiajam vandeniliui) jungiantis su tričiu, išsiskiria apie 3,5 MeV nukleonui, o dalijantis uranui – maždaug 1 MeV nukleonui.

Kad branduoliai susijungtų, jie turi patekti į branduolinių jėgų veikimo sritį, t. y. suartėti maždaug 10^{-12} cm atstumu. Dėl to jiems reikia įveikti elektrostatinės stūmos jėgas. Tai padaryti pajėgia tik labai greiti branduoliai. Vadinasi, branduolių sintezė įmanoma tik esant labai aukštai temperatūrai. Antai iš lengvųjų vandenilio izotopų helis susidaro tada, kai temperatūra siekia apie 10^8 K. Sunkieji izotopai (deuteris ir tritis) jungiasi esant $5 \cdot 10^7$ K temperatūrai. Ši reakcija vyksta taip:



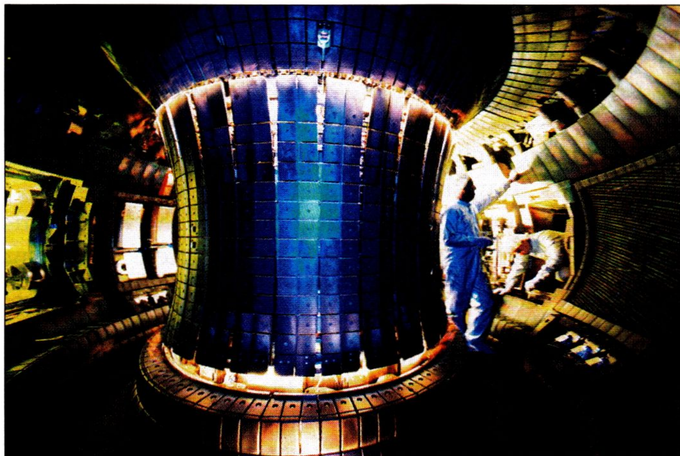
$$^{2}_{1}\mathrm{H} + ^{3}_{1}\mathrm{H} = ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}\mathrm{n} + 17{,}5\ \mathrm{MeV}. \qquad (10.18)$$

Iš deuterio ir tričio susidarius 1 g helio, išsiskiria $4{,}2 \cdot 10^{11}$ J energijos. Tiek pat jos gautume sudeginę 10 t dyzelinių degalų.

Termobranduolinių reakcijų pavyzdžiai

Skirtingų pasaulio šalių fizikai jau seniai bando sukelti valdomą termobranduolinę reakciją, tačiau jiems kol kas nelabai sekasi. Didžiausia problema – sunku atomų branduolius suartinti tiek, kad jie imtų jungtis. Tam naudojamos milžiniškos ir labai brangios lazerių sistemos, tokie pat brangūs karštų dujų ir plazmos, palaikomos magnetinių laukų, reaktoriai.

Šiuo metu JAV mokslininkams pavyko įvykdyti termobranduolinę reakciją, naudojant palyginti nedidelį (telpantį ant laboratorijos stalo) ir nelabai brangų lazerį. Kiekvieno jo impulso šviesos energija yra mažesnė už tą, kurią per sekundę išspinduliuoja kalėdinės eglutės lemputė. Tačiau šio lazerio impulsai labai trumpi, trunka vos 35 femtosekundes ($35 \cdot 10^{-15}$ s). Jų galia siekia dešimtis petavatų (1 PW = 10^{15} W). Galingais šviesos impulsais buvo apšaudomos deuterio (vandenilio izotopo) sankaupos. Kai impulsas pataikydavo į izotopų sankaupą, ji labai įkaisdavo ir sprogdavo. Deuterio branduoliai pagreitėdavo tiek, kad, susidūrę su kitais, jungdavosi tarpusavyje, suda-



10.13.1 pav.

rydami helį ir neutronus. Šios reakcijos energija nedidelė – viena dešimtmilijonoji dalis tos energijos, kuri maitina lazerį.

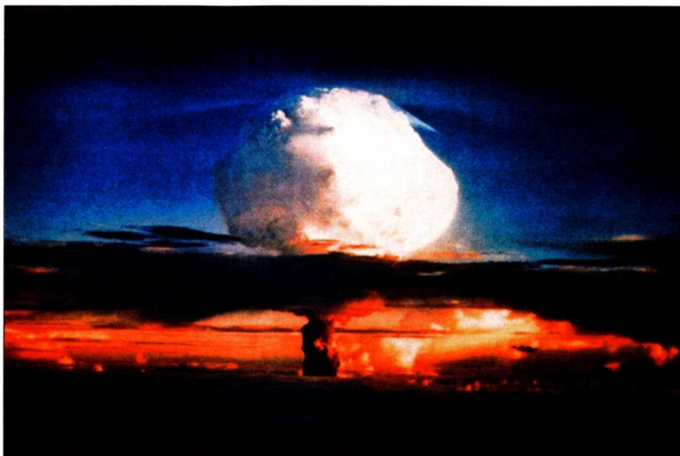
Euròpos mokslininkai plėtoja aplinkosaugai priimtinas, saugias ir atsinaujinančias energetikos technologijas. Termobranduolinė sintezė yra viena iš jų. Manoma, kad ji aprūpins žmoniją didelės galios energijos šaltiniu, kuris mažai veiks gamtą. Termobranduoliniai reaktoriai neišskiria dujų, sukeliančių šiltnamio reiškinį, ir kitų teršalų.

Pagrindinis termobranduolinės sintezės kuras (deuteris ir litis), taip pat reakcijos produktas (helis) yra neradioaktyvus. Tačiau termobranduolinės reakcijos metu susidaro radioaktyvus tritis. Jo saugos reikalavimai numatyti ir įvykdyti reaktoriaus konstrukcijoje.

Kuriamuose termobranduolinių reaktorių modeliuose naudojami stiprūs magnetiniai laukai. Jie sulaiko plazmą „vakuuminiame inde“, kuris ją atskiria nuo oro (10.13.1 pav.). Dalelės ir jų energija gerai izoliuojamos nuo degimo kameros sienų ir taip išlaikoma aukšta temperatūra, būtina termobranduolinei reakcijai vykti.

Nevaldomos termobranduolinės reakcijos jau seniai taikomos vandenilinėse (arba termobranduolinėse) bombose. Pirmoji tokia bomba buvo susprogdinta JAV 1952 m. (10.13.2 pav.). Bombų sprogdinimai kelia ekologinę grėsmę. Atsižvelgdamos į pasaulio ekologų reikalavimus, dauguma branduolinių valstybių pasirašė sutartį, draudžiančią bombų bandymus.

Termobranduolinės reakcijos Visatos evoliucijoje vaidina pagrindinį vaidmenį. Saulės ir žvaigždžių iš-



10.13.2 pav.

spinduliuojama energija yra būtent termobranduolinės kilmės. Ankstyvojoje raidos stadijoje žvaigždė būna sudaryta daugiausia iš vandenilio. Jos viduje temperatūra yra tokia aukšta, kad protonai susijungia ir susidaro helis. Vėliau, jungiantis helio branduoliams, atsiranda ir sunkesnių elementų. Vykstant visoms šioms reakcijoms, išsiskiria energija, kurią žvaigždė spinduliuoja milijardus metų. Plačiau apie tai sužinosite eidami astronomijos skyrių.

Klausimai ir užduotys ??

1. Kodėl lengvųjų branduolių jungimosi reakcijos vadinamos termobranduolinėmis?

2. Auksas – brangus metalas. Žmonijos istorijoje būta ne vieno bandymo, kuriuo buvo siekiama iš pigesnių metalų pasigaminti aukso. Įrodykite, kad tokia branduolių jungimosi reakcija yra neįmanoma.

3. Parašykite deuterio (^2_1H) ir tričio (^3_1H) branduolių jungimosi reakciją, kuriai vykstant susidaro helis. Apskaičiuokite, kiek joje išsiskiria energijos. (17,6 MeV)

4. Saulės branduolyje vyksta vandenilio sintezės reakcija ir susidaro helis: $4\,^1_1H = {}^4_2He + 2\,^0_1e + \Delta E$. Kiek energijos išsiskiria susidarant 1 kg helio, kai helio branduolio ryšio energija lygi 28,3 MeV? ($4{,}26 \cdot 10^{27}$ MeV)

5. Alfa dalelė, kurios kinetinė energija 5 MeV, artėja aukso branduolio link. Apskaičiuokite, kokiu mažiausiu atstumu ji gali priartėti prie aukso branduolio. ($4{,}6 \cdot 10^{-14}$ m)

10.14. Biologinis jonizuojančiosios spinduliuotės poveikis

Pagrindinės sąvokos

Sugertóji apšvitõs dòzė,
grẽjus,
fòninė spinduliuõtė,
dozimètras.

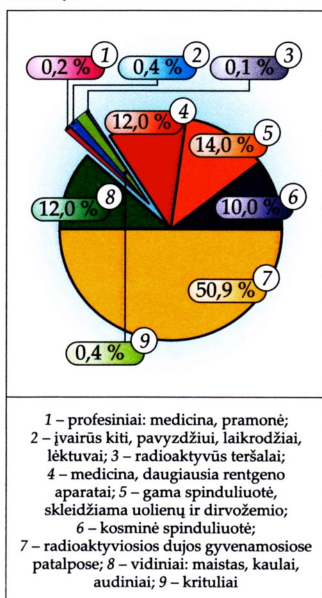
Jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniai

Elektromagnetinė spinduliuotė veikia gyvuosius organizmus. Pagal tai, ar jonizuoja medžiagą, ar ne, elektromagnetinė spinduliuotė skirstoma į jonizuojančiąją ir nejonizuojančiąją. Prie nejonizuojančiosios priskiriama regimoji šviesa, ultravioletinė ir infraraudonoji spinduliuotė, mikrobangos, žemojo dažnio elektromagnetiniai laukai, ultragarsas. Jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniai gali būti natūralūs (gamtiniai) ir dirbtiniai (10.14.1 pav.).

Gyvieji organizmai nuo jų atsiradimo Žemėje pradžios yra veikiami natūralios jonizuojančiosios spinduliuotės, kurią skleidžia aplinka. Tačiau jos poveikis silpnas ir gyvieji organizmai yra prie jo prisitaikę. Natūrali jonizuojančioji spinduliuotė gali būti kosminės (kosminė spinduliuotė) ir žemiškos kilmės (Žemės plutos, atmosferos, hidrosferos spinduliuotė). Žemės uolienos, augalai, gyvūnai, anglis $^{14}_{6}C$, žmogaus organizmas skleidžia radioaktyviąją spinduliuotę. Žemės plutos spinduliuotė labai skirtinga ir priklauso nuo vietovės. Geriamojo vandens sudėtyje taip pat gali būti radioaktyviųjų medžiagų.

Dirbtiniai jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniai yra branduolinė pramonė, branduoliniai bandymai atmosferoje, medicinos įrenginiai, buitiniai prietaisai.

10.14.1 pav.



1 – profesiniai: medicina, pramonė; *2* – įvairūs kiti, pavyzdžiui, laikrodžiai, lėktuvai; *3* – radioaktyvūs teršalai; *4* – medicina, daugiausia rentgeno aparatai; *5* – gama spinduliuotė, skleidžiama uolienų ir dirvožemio; *6* – kosminė spinduliuotė; *7* – radioaktyviosios dujos gyvenamosiose patalpose; *8* – vidiniai: maistas, kaulai, audiniai; *9* – krituliai

Jonizuojančiosios spinduliuotės poveikis gyvajam organizmui

Vykstant radioaktyviesiems virsmams, išspinduliuojamos α ir β dalelės, taip pat γ spinduliai. Lėkdamos medžiagomis, išmestos dalelės sąveikauja su jų atomų branduoliais ir elektronais ir netenka energi-

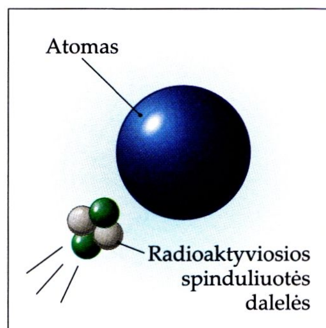
jos. Dėl to dalelių skvarba mažėja. Šiuo metu jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio mechanizmas jau yra žinomas. Netgi palyginti silpna spinduliuotė, kurios visiškai sugerta energija pakeltų kūno temperatūrą tik 0,001 K, gali sutrikdyti organizmo ląstelių gyvybinę veiklą. Ši spinduliuotė jonizuoja molekules ir atomus (10.14.2 pav.). Dėl to sudėtingos organinės molekulės virsta chemiškai aktyviomis, ląstelėje prasideda įvairūs cheminiai ir biologiniai procesai (10.14.3 pav.). Ląstelės netenka savo biologinio aktyvumo, jose sutrinka medžiagų apytaka ir dėl to jos gali žūti. Jautriausias šiai spinduliuotei – ląstelių branduolys, ypač tų, kurios greitai dalijasi (pavyzdžiui, kaulų čiulpų). Jį pažeidus, ląstelė nebegali dalytis. Kiek mažiau spinduliuotė kenkia ląstelėms, kurių kartų kaita lėta (pavyzdžiui, nervų, raumenų ląstelėms).

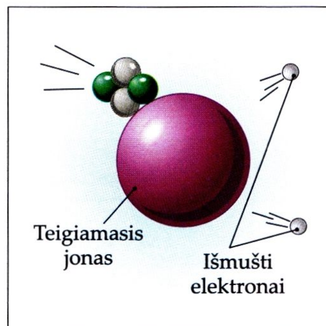
Jonizuojančiosios spinduliuotės poveikis žmogaus organizmui priklauso nuo:

- spinduliuotės rūšies ir intensyvumo;
- spinduliavimo trukmės;
- organizmo jautrumo (amžiaus, lyties, ląstelės ir jos funkcionavimo).

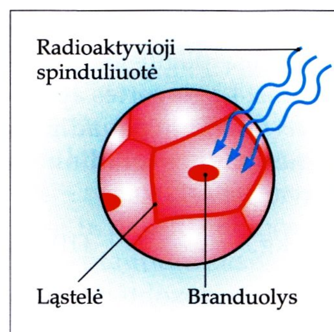
Jonizuojančioji spinduliuotė gali labai sužaloti vaiko organizmą, o ypač gemalą, kurio ląstelės dauginasi nepaprastai greitai. Vaisius šiai spinduliuotei 10–20 kartų jautresnis negu suaugusio žmogaus organizmas.

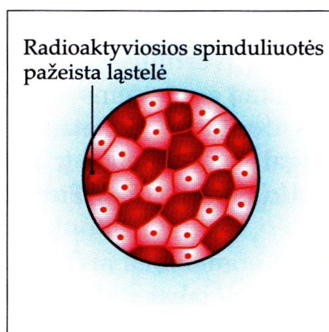
Jau minėjome, kad radioaktyvumo poveikis priklauso nuo spinduliuotės rūšies. Pirmiausia aptarkime α dalelių poveikį. Branduolių išspinduliuotų α dalelių greitis siekia keliolika tūkstančių kilometrų per sekundę. Dalelės kelias, nueitas medžiaga (siekis), priklauso nuo medžiagos tankio. Kai oro tankis norma-



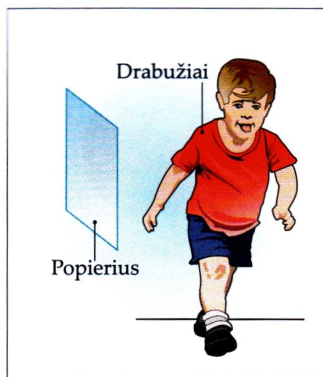


10.14.2 pav.





10.14.3 pav.

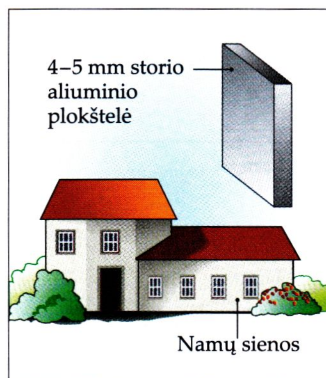


10.14.4 pav.

lus, α dalelių siekis jame yra apie 3–8 cm, aliuminyje – apie 0,06 mm, biologiniame audinyje – apie 0,1 mm. Taigi α dalelių skvarba nedidelė. Jas sulaiko popierius, drabužiai, namų sienos (10.14.4 pav.). Tačiau, patekusi į organizmą (su įkvėptu oru ir maistu), alfa spinduliuotė jį gali smarkiai biologiškai paveikti.

β dalelės, skriedamos medžiaga, kaip ir α dalelės, energiją naudoja atomams jonizuoti ir žadinti. β dalelės yra skvarbesnės už α daleles, jas sulaiko 4–5 mm storio aliuminio plokštelė, namų sienos (10.14.5 pav.). β dalelių siekis ore yra keletas metrų, o vandenyje ar biologiniame audinyje – keletas milimetrų.

Kur kas sunkiau apsisaugoti nuo γ spindulių ir neutronų, nes jie labai skvarbūs. Gama spindulius geriausiai sugeria švinas.



10.14.5 pav.

Sugertoji apšvitos dozė

Spinduliuotės poveikį gyvajam organizmui apibūdina ***sugertóji apšvitõs (jonizuojančiosios spinduliuotės) dòzė D*** – švitinamo kūno sugerta jonizuojančiosios spinduliuotės energija, tenkanti 1 kg kūno masės. Sugertosios spinduliuotės dozės matavimo vienetas SI sistemoje vadinamas *grė̃jumi* pagal anglų fiziko L. Grėjaus (*L. Gray*) pavardę ir žymimas Gy. ***Grėjus atitinka apšvitos (jonizuojančiosios spinduliuotės) dozę, kuri 1 kg masės medžiagai suteikia 1 J energijos:***

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}. \qquad (10.19)$$

Tą pačią spinduliuotės dozę kūnai gali sugerti per nevienodą laiką. Biologiniu požiūriu svarbu žinoti apšvitos dozės galią. ***Sugertõsios apšvitõs dòzės galià*** – tai apšvitos dozė, sugerta per vienetinį laiką. Jos SI vienetas yra *grė̃jus per̃ sekùndę* (1 Gy/s = 1 W/kg).

Lygiaver̃tė apšvitõs dòzė – tai sugertoji dozė, nustatyta įvertinus spinduliuotės rūšį pagal jos pavojingumą gyviesiems organizmams. Lygiavertės apšvitos dozės SI vienetas yra *sìvertas* (Sv), pavadintas pagal švedų fiziko ir radiacinės saugos pradininko Rolfo Siverto (*Rolf Sievert*) pavardę:

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}. \qquad (10.20)$$

1 Sv – labai didelė spinduliuotės dozė, todėl dažniausiai vartojamas dalinis vienetas *milisìvertas* (mSv).

Vienkartinės apšvitos dozės ir jų sukeliami padariniai

Dozė, Sv	Galimi padariniai
Nuo 0 iki 0,25	Pastebimų efektų nėra
Nuo 0,25 iki 0,50	Nedidelis baltųjų kraujo kūnelių sumažėjimas
Nuo 0,50 iki 1	Žaizdos, ženklus baltųjų kraujo kūnelių mažėjimas
Nuo 1 iki 2	Šleikštulys, vėmimas, plaukų slinkimas
Nuo 2 iki 5	Kraujoplūdis, opos, galima mirtis
5 ir daugiau	Mirtis

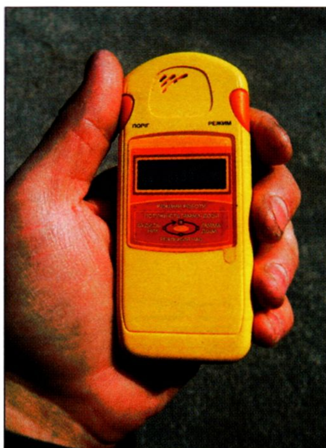
Didžiausioji leidžiamoji metinė apšvitos dozė

Grupė	Žmogaus organai	Dozė, Sv	
I	Visas organizmas, raudonieji kaulų čiulpai, lytinės liaukos	50 mSv	5 mSv
II	Raumeninis audinys, riebalinis audinys, skydliaukė, kepenys, inkstai, blužnis, virškinamasis traktas ir kiti, išskyrus I ir III grupės organus	150 mSv	15 mSv
III	Kaulinis audinys, oda, plaštakos, dilbiai, čiurnos, pėdos	300 mSv	30 mSv

Foninė spinduliuotė

Žmogaus organizmą nuolat veikia vadinamoji ***fòninė spinduliuõtė***, t. y. spinduliuotė, skleidžiama visų gamtinių ir dirbtinių šaltinių Žemėje (kosminės spinduliuotės, Žemės plutos ir atmosferos jonizuojančiosios spinduliuotės, be to, organizme esančių radioaktyviųjų kalio $^{40}_{19}K$ ir anglies $^{14}_{6}C$ izotopų). Per metus žmogus gauna maždaug 0,001 Gy foninės spinduliuotės dozę. Prie jos žmogaus organizmas jau yra pripratęs. Foninė spinduliuotė priklauso nuo vietos, kurioje matuojama. Ten, kur yra vulkaninės kilmės kalnų, daug granito, kitų mineralų, turinčių radioaktyviųjų elementų, ji būna didesnė. Skylant šiems radioaktyviesiems elementams, gali susidaryti radonas – radioaktyviosios dujos, linkusios kauptis patalpose ir pakelti foninės spinduliuotės lygį.

Tarptautiniu susitarimu nustatyta leidžiamoji spinduliuotės dozės galia – 0,05 Gy per metus. Vadinasi, žmogus gali dirbti aplinkoje, kurioje spinduliuotė yra



10.14.6 pav.

mažiau kaip 50 kartų didesnė už foninę. Gyvenamosiose patalpose ji gali būti ne daugiau kaip 5 kartus didesnė už foninę.

Jonizuojančiosios spinduliuotės matavimo prietaisai

Jonizuojančiosios spinduliuotės žmogus nejunta. Radioaktyviąsias medžiagas galima praryti, įkvėpti visiškai to nejaučiant. Jų poveikis pastebimas ne iš karto, o po tam tikro laiko. Kai į žmogaus organizmą nuolat patenka radioaktyviųjų medžiagų, apšvitos dozės ilgainiui kaupiasi ir pasidaro kenksmingos. Norint to išvengti, naudojami specialūs prietaisai jonizuojančiajai spinduliuotei registruoti: Vilsono ir burbulinė kamera, storasluoksnės fotoemulsijos, Geigerio skaitiklis, integriniai įrenginiai. Jie teikia informaciją apie jonizuojančiąją spinduliuotę.

Išorinės apšvitos dozė matuojama ***dozimètrais*** (10.14.6 pav.). Taip vadinami prietaisai, matuojantys apšvitos dozės galią arba pačią dozę. Jie turi fotoplėvelę, kurią apšviečia jonizuojančioji spinduliuotė. Plėvelė periodiškai ryškinama, o jos patamsėjimas rodo gautą apšvitos dozę.

Klausimai ir užduotys

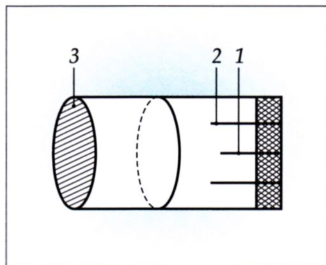
1. Kokie yra jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniai?

2. Apibūdinkite jonizuojančiosios spinduliuotės poveikį gyviesiems organizmams.

3. Kišeninio dozimetro schema pavaizduota 10.14.7 paveiksle. Šis dozimetras naudojamas rentgeno ir gama spinduliuotės dozei matuoti. Kad prietaisas pradėtų veikti, reikia įkrauti jo elektroskopą *1*. Didėjant apšvitos dozei, elektroskopo siūlas *2* nukrypsta vis labiau. Siūlo nuokrypį galima matyti pro dozimetro okuliarą *3*. Paaiškinkite, kaip veikia šis elektroskopas.

4. Po branduolinio sprogimo aplinkoje lieka daug radioaktyviųjų izotopų, kurių pusėjimo trukmė skirtinga. Kurie iš jų kelia didžiausią pavojų žmonėms, patekusiems į užterštą vietovę po tam tikro laiko? Atsakymą pagrįskite.

10.14.7 pav.



10.15. Branduolinės energetikos privalumai ir problemos

Branduolinės energetikos raida

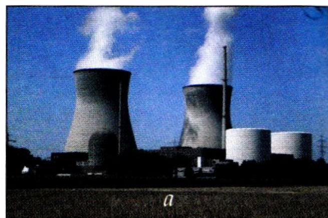
Pasaulyje sparčiai plėtojama branduolinė energetika. Eurõpos ir Japònijos atominėse elektrinėse (10.15.1 pav.) gaminama daugiau kaip 30 % elektros energijos, Prancūzìjoje, Lietuvojè, Slovãkijoje ir Bel̃gijoje ši energijos dalis sudaro daugiau kaip 50 %, JAV – apie 20 %.

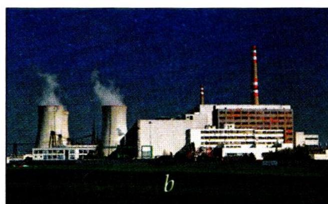
Branduolinė energija naudojama ne tik atominėse elektrinėse, bet ir laivuose. Šiuo metu tokių laivų pasaulyje yra daugiau kaip 400. Manoma, kad po 50 metų energijos bus suvartojama dvigubai daugiau negu dabar.

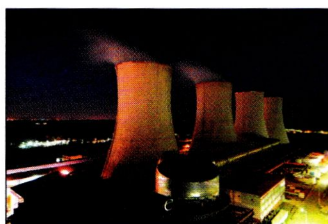
Branduolinė energija išsprendžia daugelį problemų, atsirandančių dėl tradicinio kuro vartojimo. Ji nesukelia šiltnamio reiškinio, negamina tiek daug kitokių sveikatai, augmenijai, pastatams pavojingų ir rūgščiuosius lietus sukeliančių dujų. Be to, branduolinio kuro energijos atsargos yra milžiniškos.

Branduolinių jėgainių plėtrą skatina žemesnė jose gaminamos elektros savikaina. 2000 m. ji siekė 1,72 JAV ct/kWh. Elektra, gaminama šiluminėse elektrinėse, kurios degina akmens anglis, 1999 m. kainavo 2,07 JAV ct/kWh, kurios degina naftos produktus (mazutą) – 3,24 JAV ct/kWh, o gamtines dujas – 3,52 JAV ct/kWh.

Šalia minėtų privalumų akivaizdūs branduolinės energetikos trūkumai. Pirmiausia didelė tikimybė įvykti avarijoms, kurių metu radioaktyviosios medžiagos gali išsiveržti į aplinką. Net jei elektrinė eksploatuojama laikantis saugos reikalavimų, susirūpinimą kelia branduolinio kuro ir jo atliekų laikymas, elektrinių uždarymas. Plačiau aptarkime panaudoto branduolinio kuro problemas.


a


b


c

10.15.1 pav.



10.15.2 pav.

Panaudoto branduolinio kuro samprata

Panaudotas branduolinis kuras – tai kuras, po apšvitinimo išimtas iš reaktoriaus ir netinkantis toliau naudoti kaip energijos šaltinis tokio tipo reaktoriuje (10.15.2 pav.). Jame yra beveik visų periodinės lentelės elementų, tačiau jų kiekis skiriasi. Dauguma elementų radioaktyvūs. Panaudotas branduolinis kuras yra gana vertinga antrinė branduolinio kuro komponentų, taip pat radioaktyviųjų izotopų, naudojamų žemės ūkyje, medicinoje ir pramonėje, žaliava. Antra vertus, jis yra pavojingas branduolinės energetikos veiklos produktas.

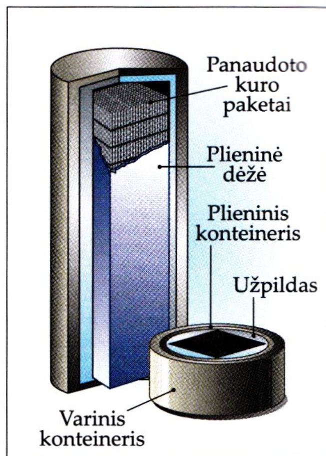
Panaudoto branduolinio kuro privalumai

Pirma aptarkime, kuo vertingas panaudotas branduolinis kuras. Jame yra labai brangaus plutonio, atitinkančio daugiau kaip 60 % įsodrintą uraną. Nustatyta, kad kiekviena tona panaudoto branduolinio kuro turi apie 10 kg plutonio. Geologai panaudotą branduolinį kurą vertina kaip urano-plutonio rūdą, kurioje svarbiausių galinčių skilti izotopų yra apie 1000 kartų daugiau negu gamtinėje urano rūdoje. Be to, šiame kure randama daug brangiai kainuojančių platinoidų (apie 0,5 %). Jis taip pat turi radžio. Kadangi šio elemento atsargos gamtoje gana ribotos, tai panaudotas branduolinis kuras yra svarbus strateginis radžio šaltinis. Panaudotame kure randama paladžio ir cirkonio. Apytiksliai skaičiavimai rodo, kad antrinių metalų, esančių vienoje tonoje šio kuro, kaina yra apie 250 000 JAV dolerių.

Panaudoto branduolinio kuro trūkumai

Panaudotas branduolinis kuras, nors ir turi nemažai privalumų, vis dėlto yra atlieka. Pirmiausia todėl, kad vertingų komponentų išskyrimas iš jo reikalauja sudėtingų technologijų, o jų parengimas kainuoja labai brangiai. Jo perdirbimo technologija yra sudėtinga, nes tenka dirbti su dideliais kiekiais radioakty-

viųjų medžiagų. Pradėti panaudoto branduolinio kuro perdirbimą, parengti reikalingus specialistus, mokslinę-pramoninę infrastruktūrą dar labai sunku. Nemažą jo kiekį perdirba tik keturios šalys: Didžioji Britãnija, Prancūzijà, Rùsija ir Japònija, o pirmosios trys – ir kai kurių kitų šalių panaudotą branduolinį kurą. Daugelis šalių ne tik sutinka atiduoti savo panaudotą branduolinį kurą, bet dar už tai ir sumoka. Ekonominiu požiūriu tai yra suprantama. Kad panaudoto branduolinio kuro gamykla būtų pelninga, per metus ji turi perdirbti ne mažiau kaip 1000 t. Tipinis 1000 MW blokas per metus sukaupia apie 25 t šio kuro. Vadinasi, gamykla turi surinkti mažiausiai 40 blokų kuro atliekas. Tokio masto branduolinė energetika pasaulyje išplėtota tik trijose šalyse: JAV, Prancūzìjoje ir Japònijoje.



10.15.3 pav.

Branduolinė energetika šiuo metu plėtojama daugiau kaip 30 šalių. Manoma, kad šis skaičius gali padidėti iki 50. Tačiau didžioji dalis šalių turės tik po keletą energetinių blokų. Taigi perdirbti panaudotą branduolinį kurą galės tik didžiausios branduolinės valstybės (galbūt jų bus apie 10). Kitoms teks mokėti už šią paslaugą. Planuojama šio amžiaus viduryje daugkartinį branduolinio kuro perdirbimą paversti viena didžiausių energetikos šakų.

Į panaudoto branduolinio kuro sudėtį įeina labai aktyvūs trumpaamžiai ir ilgaamžiai izotopai. Todėl tokį kurą reikia saugoti specialiuose konteineriuose (10.15.3 pav.), laukiant, kol dauguma izotopų suskils į stabilius arba bent mažiau radioaktyvius. Panaudoto branduolinio kuro tvarkymo technologijų, jų ekologinio ir ekonominio tikslingumo klausimai kiekvienu konkrečiu atveju turi būti sprendžiami atsižvelgiant į visas panaudoto kuro charakteristikas.

Panaudoto branduolinio kuro kiekis kasmet padidėja 11–12 tūkst. t. 2002 m. pradžioje pasaulyje buvo sukaupta 270 tūkst. t šių teršalų. Tačiau reikia pabrėžti, kad atominėse elektrinėse kasmet sukaupiamas panaudotas branduolinis kuras sudaro labai menką dalį tais metais surinktų labai toksiškų atliekų. Visas panaudotas branduolinis kuras laikomas saugiose, kompaktinėse, patikimai kontroliuojamose saugyklose.

Skyriaus „Atomo ir branduolio fizika" apibendrinimas

Boro postulatai	1. Atominė sistema gali būti tik ypatingų nuostoviųjų, arba kvantinių, būsenų, kurių kiekvieną atitinka tam tikra energija E_n; nuostoviosios būsenos atomas nespinduliuoja energijos. 2. Pereidamas iš vienos nuostoviosios būsenos į kitą, atomas išspinduliuoja arba sugeria elektromagnetinės spinduliuotės energijos kvantą.
Elementariosios dalelės	Visos dalelės, susisteminus jų savybes, suskirstytos į tokias klases: fotonus, leptonus, mezonus ir barionus.
Natūralusis radioaktyvumas	Savaiminis vienų atomų branduolių virsmas kitų atomų branduoliais, kurio metu skleidžiama jonizuojančioji spinduliuotė ir kai kurios elementariosios dalelės, vadinamas natūraliuoju radioaktyvumu.
Alfa, beta ir gama spinduliuotė	α dalelės krūvis lygus dviem elementariesiems krūviams ($+2e$). Alfa spinduliuotę sudaro helio branduolių srautas. α spinduliuotė yra mažiausiai skvarbi, pro 0,1 mm storio popieriaus sluoksnį ji nepereina. β spinduliuotė – tai greitai skriejančių elektronų srautas. Ši spinduliuotė skvarbesnė už α spinduliuotę. Ją gali sulaikyti tik kelių milimetrų storio aliuminio plokštelė. γ spinduliuotė yra labai trumpos (nuo 10^{-8} cm iki 10^{-11} cm ilgio) elektromagnetinės bangos. γ spinduliuotė labai skvarbi.
Radioaktyviojo skilimo dėsnis	Šis dėsnis išreiškiamas formule $$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}};$$ čia N_0 – radioaktyviųjų atomų branduolių skaičius pradiniu laiko momentu ($t = 0$), N – nesuskilusių atomų branduolių skaičius laiko momentu t, T – radioaktyviojo elemento atomų branduolių pusėjimo trukmė.
Pusėjimo trukmė	Pusėjimo trukme vadinamas laiko tarpas, per kurį suskyla pusė pradiniu laiko momentu buvusių radioaktyviosios medžiagos atomų.
Protoninis-neutroninis atomo branduolio modelis	Pagal šį modelį atomo branduolį sudaro protonai ir neutronai. Šios dalelės kartu vadinamos nukleonais.
Izotopai	Cheminio elemento atomų branduoliai, turintys tiek pat protonų, bet skirtingą skaičių neutronų, vadinami izotopais. Jie žymimi tuo pačiu simboliu ir užima tą patį periodinės cheminių elementų lentelės langelį.

Branduolio ryšio energija	Atomo branduolio ryšio energija nusakoma darbu, kurį reikia atlikti norint suskaldyti branduolį į pavienius nukleonus, bet nesuteikti jiems kinetinės energijos.
Masės defektas	Branduolio, turinčio Z protonų ir N neutronų, masė yra mažesnė už to paties skaičiaus laisvųjų protonų ir neutronų masių sumą: $$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{br} > 0.$$
Savitoji branduolio ryšio energija	Savitąja branduolio ryšio energija vadinamas branduolio ryšio energijos ΔE_r ir branduolį sudarančių nukleonų skaičiaus A santykis. Ji rodo, kiek branduolio ryšio energijos tenka vienam nukleonui.
Branduolinė reakcija	Branduoline reakcija vadinamas elementų atomų branduolių, sąveikaujančių su elementariosiomis dalelėmis arba tarp savęs, virsmas. Branduolinės reakcijos būna egzoterminės ir endoterminės.
Branduolinės reakcijos energija	Elementų branduolių ir elementariųjų dalelių rimties energijų prieš reakciją ir po jos skirtumas vadinamas branduolinės reakcijos energija. Reakcijoje dalyvaujančių dalelių kinetinės energijos pokytis taip pat nusako branduolinės reakcijos energiją.
Grandininė branduolinė reakcija	Grandinine branduoline reakcija vadinama savaime plintanti branduolinė reakcija, kurią palaiko jos pačios produktai.
Kritinė masė	Mažiausia masė, kuriai esant dar gali vykti grandininė reakcija, vadinama kritine mase.
Neutronų daugėjimo koeficientas	Neutronų daugėjimo koeficientas k lygus kurios nors kartos neutronų skaičiaus N_2 ir juos išlaisvinusios kartos neutronų skaičiaus N_1 santykiui: $$k = \frac{N_2}{N_1}.$$
Branduolinis reaktorius	Įrenginys, kuriame vyksta valdomoji grandininė branduolinė reakcija, vadinamas branduoliniu reaktoriumi.
Termobranduolinės reakcijos	Aukštos temperatūros sąlygomis vykstančios lengvųjų branduolių jungimosi reakcijos vadinamos termobranduolinėmis, pavyzdžiui, ${}^1_1H + {}^3_1H = {}^4_2He + {}^1_0n + \Delta E$.
Sugertoji apšvitos dozė	Sugertoji apšvitos dozė D yra fizikinis dydis, apibūdinantis švitinamo kūno sugertą jonizuojančiosios spinduliuotės energiją, tenkančią 1 kg kūno masės. Sugertoji apšvitos dozė matuojama grėjais: $$[D] = 1\ \text{Gy} = 1\ \text{J/kg}.$$ Grėjus atitinka apšvitos (jonizuojančiosios spinduliuotės) dozę, kuri 1 kg masės medžiagai suteikia 1 J energijos.



Astronomija

11 Astronomija

Šiame skyriuje prisiminsite X klasėje įgytas astronomijos žinias ir jas papildysite, aptarsite Žemės sandaros ypatumus, Mėnulio – vienintelio Žemės palydovo – savybes ir įtaką gyvenimui Žemėje, plačiau nagrinėsite Saulės sistemos sudėtį, žvaigždes, jų sandarą, žvaigždynus, skyriaus pabaigoje gvildensite galaktikų sandarą ir Visatos evoliuciją.

11.1. Astronomijos mokslo samprata ir ryšys su kitais mokslais

Pagrindinės sąvokos

Astronòmija, astrofìzika, dangaũs mechãnika, kosmològija, planetològija.

Astronomijos samprata

Astronomija yra vienas iš seniausių gamtos mokslų. Astronomijos žinių jau prieš tūkstančius metų turėjo babiloniečiai, egiptiečiai, kinai. Tas žinias jie taikė orientuodamiesi erdvėje, matuodami laiką. ***Astronòmija*** (gr. *astron* – žvaigždė, *nomos* – dėsnis) – ***mokslas, tiriantis dangaus kūnų ir jų sistemų kilmę, sandarą, judėjimą ir evoliuciją.*** Mokslo, technikos ir žinių visuomenės amžiuje astronomija padeda pažinti ir įvaldyti kosminę erdvę, pasiekti naujų laimėjimų kosmonautikoje, nagrinėja įvairių kosminių kūnų įtaką Žemei. Be to, dabarties sąlygomis, kaip ir prieš tūkstančius metų, astronomijos žinios taikomos tiksliam laikui ir geografinėms koordinatėms (kosmonautikoje, aviacijoje ir kt.) nustatyti. Plėtojantis astronomijos mokslui, palaipsniui susiformavo svarbiausios jo šakos: astrometrija, dangaus mechanika ir astrofizika.

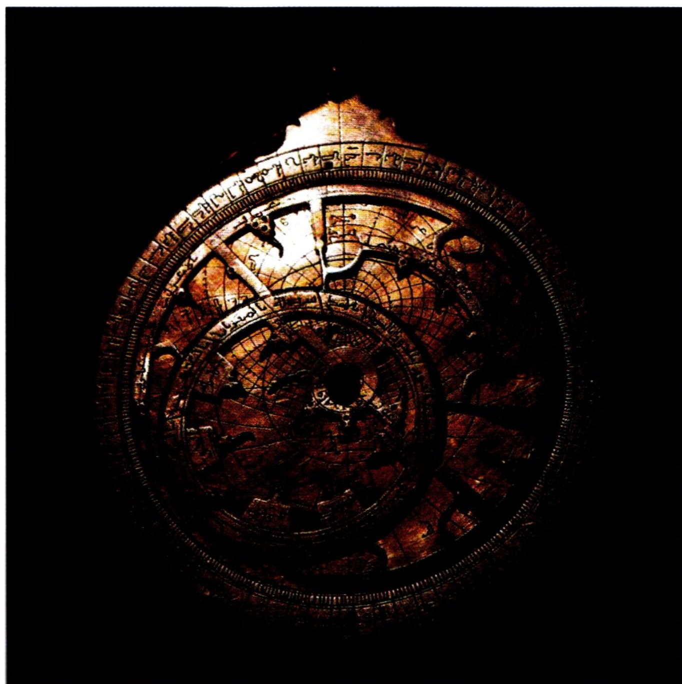
Astromètrija (gr. *astron* – žvaigždė, *metreō* – matuoju) – astronomijos šaka, tirianti tiek regimąją, tiek tikrąją dangaus kūnų padėtį ir jos kitimą dangaus skliaute, Žemės sukimąsi apie ašį, tikslinanti astronomines konstantas. Tobulėjant astronomijos mokslui, keitėsi dangaus šviesulių padėties nustatymo metodai ir prietaisai, didėjo matavimo tikslumas. Žvaigždėto dangaus nuotrauka ilgai buvo pagrindinis astrometrijos įrankis. Dabar dangus fotografuojamas teleskopais (apie juos kalbėjome 7 skyriuje), o nuotraukos tiriamos laboratorijose. Šiuo metu žvaigždžių padėčiai nuotraukose tirti naudojami sudėtingi ir modernūs aparatai – mikrodensitomètrai (gr. *mikros* – mažas, *densitas* – tankis, *metreō* – matuoju). Juose naudojama lazerinė technika leidžia labai tiksliai įvertinti optinį tankį. Vėliau duomenys perduodami į kompiuterį, kuris pagal optinio tankio kitimą atpažįsta žvaigždes ir nustato jų koordinates.

Atsiradus kompiuteriams, optiniams interferomètrams ir radiointerferometrams, moderniems dvimãčiams spinduliuotės imtuvams (CCD), palengva atsisakyta anksčiau naudotų prietaisų (pavyzdžiui, astroliabijų; 11.1.1 pav.). Dvimačiais spinduliuotės imtuvais sukuriami elektroniniai objektų atvaizdai. Jie yra informatyvesni už fotografinius.

Astrometrijos duomenys plačiai taikomi geodèzijoje, geofìzikoje, kartogrãfijoje, kosmonáutikoje, dangaũs mechãnikoje. Su astrometrija glaudžiai siejasi praktinė astronomija.

Dangaũs mechãnika – astronomijos šaka, tirianti gravitacijos jėgų veikiamų kosminių kūnų ir erdvėlaivių judėjimą. Dangaus mechanika kuria metodus kosminio kūno trajektorijai apskaičiuoti įvairiais momentais, žinant keletą jo padėčių dangaus sferoje, tų kūnų padėčiai nustatyti pagal trajektoriją.

Astrofìzika – astronomijos šaka, nagrinėjanti fizikinius ir cheminius procesus, vykstančius Saulės sistemos kūnuose, žvaigždėse, tarpžvaigždinėje medžiagoje. Ši mokslo šaka susiformavo XIX a. antrojoje pusėje, pritaikius fotografiją ir spektrinę analizę. Astrofizikai taip pat rūpi Saulės sistemos kūnų kilmė, sandara, raida, cheminė sudėtis. Astrofizikos dalis,



11.1.1 pav.

tirianti visos Visatos prigimtį, sandarą, kilmę ir raidą, vadinama ***kosmològija***. Astrofizika yra svarbiausia astronomijos šaka, kuri remiasi kitų šakų (astrometrijos, dangaus mechanikos) išvadomis ir rezultatais. Reikia pabrėžti, kad visos astronomijos šakos yra glaudžiai tarpusavyje susijusios, viena kitą papildo.

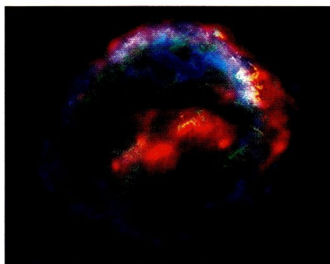
Astronomijos ir kitų mokslų ryšys

Šių dienų astronomija glaudžiai siejasi su matematika ir fizika, chemija ir biologija, geografija ir geologija, taip pat kosmonautika. Astrofizikos rezultatais domisi chemijos mokslas. Tarpžvaigždinėje medžiagoje, žvaigždėse, planetose ir kometose randama daug molekulių, radikalų. Kai kurie iš jų kelia chemijos ir biologijos mokslų srityje dirbančių mokslininkų susidomėjimą, nes yra svarbūs mėginant paaiškinti gyvybės atsiradimą.


11.1.2 pav.

Astronomija tiria medžiagas, kurios kosmose yra tokių būsenų, kokių neįmanoma pasiekti Žemėje įrengtose laboratorijose. Pavyzdžiui, kai kuriose molekulinių debesų (11.1.2 pav.) vietose dujos ir dulkelės būna atšalusios iki 5–20 K. Supernovos sprogimo (11.1.3 pav.) metu temperatūra jos šerdyje siekia daugiau kaip 10^{11} K. Visatoje galima atrasti ir superdidelio tankio medžiagos, ir supervakuumo. Žinome, kad dujų, užpildančių visą Galaktiką, vidutinis tankis yra labai mažas – kiekvienai dujų dalelei tenka 10^3 cm^3 tuščios erdvės. O neutroninių žvaigždžių kubiniame centimetre telpa net 10^9 t medžiagos.

Sąveikaujant astronomijos, geologijos, geofizikos, geodezijos, geochemijos ir geografijos mokslams, atsirado naujas mokslas, vadinamas ***planetològija***. Tai astrofizikos šaka, tirianti planetų ir jų palydovų sandarą, kilmę, evoliuciją, fizines ir chemines savybes.

11.1.3 pav.


Daug informacijos astronomijai teikia elektromagnetinės bangos. Per fizikos pamokas aptarėte skirtingas jų rūšis, sudarančias elektromagnetinių bangų skalę. Astronomai nemažai žinių gauna iš radijo bangų, regimosios šviesos, ultravioletinės, infraraudonosios ir rentgeno spinduliuotės. Astronomijoje išskiriama dviejų rūšių ultravioletinė bei infraraudonoji spinduliuotė: artimoji ir tolimoji. Artimąją spinduliuotę gerai praleidžia Žemės atmosfera, todėl ji registruojama Žemės paviršiuje pastatytais teleskopais.

Tolimosios spinduliuotės Žemės atmosfera nepraleidžia. Ji registruojama kosminiais teleskopais, įrengtais erdvėlaiviuose. Rentgeno spinduliuotę pavyksta registruoti tik specialios konstrukcijos kosminiais teleskopais.

Astronomija – vienas iš labiausiai kintančių gamtos mokslų. Mokantis astronomijos, reikia atkreipti dėmesį į tai, kad ne visos gautos žinios yra patikimi faktai. Kai kurios iš jų – tik mokslinės prielaidos.

Klausimai ir užduotys

1. Remdamiesi istorijos ir geografijos dalykų žiniomis, pateikite pavyzdžių apie babiloniečių, egiptiečių, kinų astronomijos žinias.

2. Ką vadiname astronomija? Kaip astronomija susijusi su kitais mokslais? Pateikite pavyzdžių.

3. Išvardykite astronomijos mokslo šakas. Nurodykite, ką jos tiria.

4. Prisiminkite, kokių astronomijos žinių įgijote mokydamiesi fizikos XI ir XII klasėje. Ką apie ją žinote iš kitų informacijos šaltinių: televizijos laidų, interneto?

11.2. Saulės sistemos planetos

Saulės sistemos sandara

X klasėje mokydamiesi astronomijos, sužinojote, kad Saulės sistemą sudaro Sáulė, devynios planetos, jų palydovai, asteroidai ir meteoroidai. Planetos pagal jų atstumą iki Saulės išsidėsčiusios taip: Merkùrijus, Venerà, Žẽmė, Mársas, Jupìteris, Satùrnas, Urãnas, Neptū̃nas, Plutònas (11.2.1 pav.). Saulės sistemos planetos skirstomos į tris grupes:

- ***Žẽmės grùpės planetàs*** (prie jų priskiriami Merkurijus, Venera, Žemė ir Marsas), sudarytas daugiausia iš silikatų bei metalų ir turinčias nedaug palydovų. Šios grupės planetų paviršius kietas, o tankis didelis.

Pagrindinės sąvokos

Žẽmės grùpės planètos (Merkùrijus, Venerà, Žẽmė, Mársas),

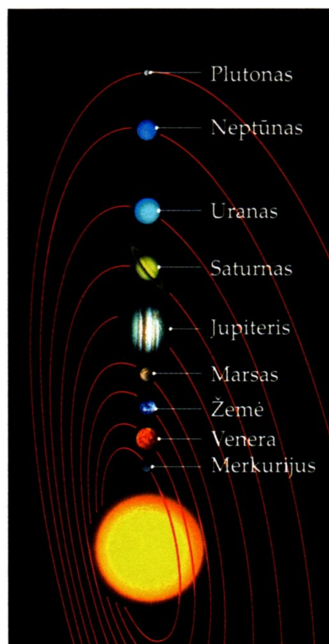
dìdžiosios planètos (Jupìteris, Satùrnas, Urãnas, Neptū̃nas),

nykštùkinės planètos (Plutònas, Cererà, Erìdė).

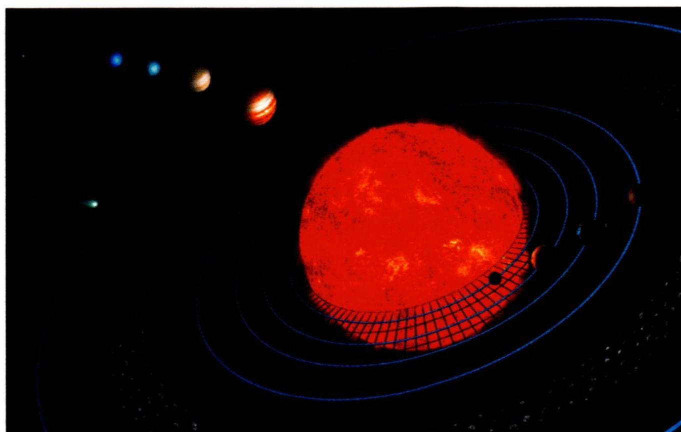
Palyginti su kitomis planetomis, jos lėčiau sukasi apie savo ašis, jas gaubia retesnės atmosferos.

- ***Didžiąsias planetàs*** (joms priklauso Jupiteris, Saturnas, Uranas ir Neptūnas), sudarytas iš lengvųjų dujų (vandenilio, helio) ir šiek tiek tankesnių medžiagų. Didžiosios planetos greičiau negu Žemės grupės planetos sukasi apie savo ašis, jas gaubia tankesnės atmosferos. Šios planetos turi daug palydovų, riba tarp jų paviršiaus ir atmosferos nėra ryški.
- ***Nykštùkines planetàs*** (joms priklauso Plutonas, Cererà ir Erìdė, anksčiau vadinta 2003 UB 313). Nykštukinių planetų grupė buvo išskirta neseniai. 2006 m. rugpjūčio 24 d. Tarptautinė astronomų sąjunga patvirtino nykštukinės planetos sampratą. Nykštukine planeta pavadintas dangaus kūnas, kuris sukasi apie Saulę, turi nemažą masę, yra beveik apvalus, nėra dominuojantis savo orbitoje, nėra palydovas.

Didžiųjų ir Žemės grupės planetų dydis palyginamas 11.2.2 paveiksle. Prisiminkime pagrindines Saulės sistemos planetų charakteristikas.



11.2.1 pav.


11.2.2 pav.

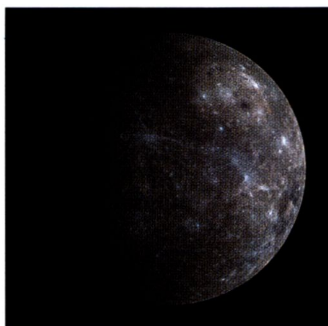
Merkurijus

Merkurijus (11.2.3 pav.) yra arčiausiai Saulės skriejanti planeta. Saulę ji apskrieja per 88 Žemės paras. Viena para Merkurijuje trunka 176 Žemės paras. Taigi Merkurijaus metai perpus trumpesni už jo parą. Merkurijus – maža planeta. Jo ir kitų planetų matmenis galite palyginti pagal 6 priedą (žr. p. 308). Merkurijaus tankis artimas Žemės tankiui (5430 kg/m^3). Spėjama, kad Merkurijų sudaro apie 1600 km spin-

dulio branduolys, susidedantis iš geležies ir nikelio lydinio, o iš viršaus jį dengia plona silikatų mantija.

Atmosferos Merkurijus beveik neturi, todėl dieną jo pusrutulis įkaista net iki 700 K. Tokiame karštyje lydosi švinas. Naktį čia temperatūra nukrinta iki 100 K. Palyginti su kitomis planetomis, temperatūra Merkurijuje svyruoja smarkiausiai. Merkurijaus paviršius labai nelygus, nusėtas gausybės kraterių. Tuo jis panašus į Mėnulio paviršių.

Merkurijus turi silpną, net 200 kartų silpnesnį negu Žemė, magnetinį lauką. Palydovų jis neturi.


11.2.3 pav.

Venera

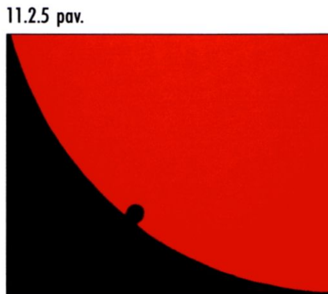
Venera yra antra pagal nuotolį nuo Saulės planeta ir trečias pagal ryškumą danguje (po Saulės ir Mėnulio) objektas (11.2.4 pav.). Ji matoma 3–4 h prieš saulėtekį arba tiek pat po saulėlydžio. Dėl to Venera dar vadinama Aušrinė arba Vakarinė. Apie savo ašį ji sukasi labai lėtai, be to, priešinga kryptimi negu kitos planetos.

Veneros atmosfera yra nepaprastai tanki, todėl jos slėgis planetos paviršiuje net 90 kartų didesnis negu prie Žemės. Veneros atmosfera sudaryta daugiausia iš anglies dioksido (≈ 96 %). Joje dar yra šiek tiek azoto, sieros dioksido, argono, helio ir kitų dujų. Veneros debesyse aptinkama 2–3 μm dydžio sieros rūgšties lašelių ir 5–8 μm dydžio geležies chlorido kristalų. Planetos atmosferoje vyksta šiltnamio reiškinys, todėl jos temperatūra siekia apie 730 K. Veneroje nepaliaujamai pučia rytų vėjas. Prie paviršiaus jo greitis yra apie 1 m/s, o 60–70 km aukštyje – apie 100 m/s.


11.2.4 pav.

Veneros magnetinis laukas labai silpnas, jo stipris – vos 10^{-4} Žemės magnetinio lauko stiprio. Pagal teorinį Veneros modelį ją sudaro apie 2800 km spindulio branduolys, 3200 km storio silikatų mantija ir 16 km storio bazaltų pluta. Palydovų Venera neturi.

Naujų žinių apie šią planetą suteikė tarpplanetinių stočių skrydžiai. Venerą pasiekė 21 kosminė stotis, 17 stočių leidosi arba numetė zondus.

11.2.5 pav.


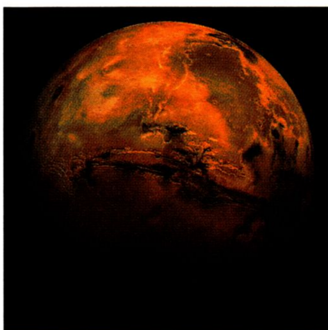
Jei Žemės ir Veneros orbitų plokštumos sutaptų, tai kiekvieną kartą prasilenkdami Venerą matytume kaip juodą taškelį, slenkantį Saulės disku (11.2.5 pav.), – Veneros tranzitą. Tačiau tokie reiškiniai pasi-

taiko labai retai. Paskutiniai iš jų vyko 1874 m., 1882 m. ir 2004 m. Artimiausias Veneros tranzitas bus 2012 m. birželio 6 d. Per vieną iš tranzitų rusų mokslininkas Michailas Lomonosovas atrado šios planetos atmosferą.

Žemė

Tai mūsų planeta. Jai skiriama atskira tema.

Marsas


11.2.6 pav.

Rausvasis Žemės kaimynas – Marsas (11.2.6 pav.). Jo skersmuo mažesnis negu Žemės 2 kartus, o masė – 9,3 karto. Ši planeta apskrieja aplink Saulę per 687 paras. Taigi Marso metai beveik dvigubai ilgesni už Žemės metus. Marso sukimosi ašis pasvirusi į jo orbitos plokštumą (64,8°) panašiai kaip Žemės. Todėl Marse, kaip ir Žemėje, keičiasi metų laikai. Tačiau jų trukmė čia du kartus ilgesnė.

Išskirtinis Marso požymis – baltos ašigalinės kepurės, kurias sudaro ledas ir sušalęs anglies dioksidas. Jas galima įžiūrėti ir pro nedidelį teleskopą.

Apie tai, kad Marsas turi atmosferą, buvo žinoma jau seniai. Ji labai išretėjusi, o jos slėgis beveik 100 kartų mažesnis negu Žemės atmosferos. Marso atmosfera sudaryta daugiausia iš anglies dioksido. Deguonies ir vandens garų joje mažai. Virš ašigalinių kepurių kartais galima pamatyti retus baltus debesis ir rūką. Kadangi Marso atmosfera reta, šiltnamio reiškinys šioje planetoje nevyksta. Dieną Marso paviršius įkaista iki 300 K, naktį atvėsta iki 18 K. Didelis temperatūros skirtumas sukelia stiprius vėjus, o šie – dulkių audras, apimančias visą planetą.

Vientiso magnetinio lauko Marsas neturi. Aptikta tik pavienių jo židinių.

Sandara Marsas panašus į Žemę. Jo paviršių dengia pluta, po ja yra mantija ir branduolys. Marse gausu smiltingų dykumų, kurios suteikia planetai rausvą spalvą. Čia aptikta užgesusių ugnikalnių, kraterių, kanjonų, primenančių išdžiūvusių Žemės upių vagas.

Dabar Marsas – sausa ir šalta smėlio kopų ir akmenų dykuma. Manoma, kad kadaise jame tyvuliavo jūros, ežerai, tekėjo upės. Gal kažkada šioje planetoje egzistavo ir gyvybė. Tiesioginių jos požymių Marse

ieškojo aparatai „Viking“. Jų bandymai parodė, kad šiuo metu gyvybės Marse nėra. Tačiau neaišku, kokie bus kitų tyrimų rezultatai.

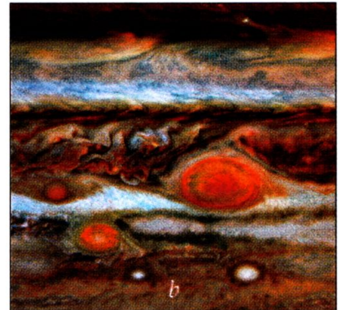
Marsas turi du mažus netaisyklingos formos palydovus: Fòbą ir Deĩmą.

Jupiteris

Tai yra pati didžiausia Saulės sistemos planeta (11.2.7 pav., *a*). Pagal ryškumą danguje ji – antroji po Veneros. Jupiteris Saulę apskrieja per 12 Žemės metų. Planetos sukimosi ašis beveik statmena jos orbitos plokštumai, todėl Jupiteryje metų laikai nesikeičia.

Kaip ir visos didžiosios planetos, Jupiteris labai greitai sukasi apie savo ašį. Dėl to ir dėl mažo tankio planeta yra šiek tiek susiplojusi. Jos paplokštumas matomas net pro teleskopą. Jupiterį gaubia tanki atmosfera, susidedanti iš molekulinio vandenilio (≈ 74 %), helio (≈ 24 %), vandens garų ir kitų medžiagų. Net pro silpną teleskopą Jupiterio atmosferoje galima matyti debesų juostas, kurios dėl planetos sukimosi išsidėsčiusios lygiagrečiai su pusiauju. Pakaitomis eina maždaug 10 porų rudų ir baltų juostų. Raudoną, geltoną ir rudą spalvą debesims suteikia amorfinis fosforas, amonio polisulfidai ir siera. Baltose juostose dujos kyla aukštyn, o vėjas pučia iš vakarų į rytus, rudose, atvirkščiai, dujos leidžiasi žemyn, o vėjas pučia iš rytų į vakarus. Vėjo greitis siekia iki 180 m/s. Rudų ir baltų juostų sąlyčio vietoje susidaro sūkuriai. Iš jų labiausiai pastebima ovalo formos Didžiói Raudonóji Dėmė̃ (11.2.7 pav., *b*).





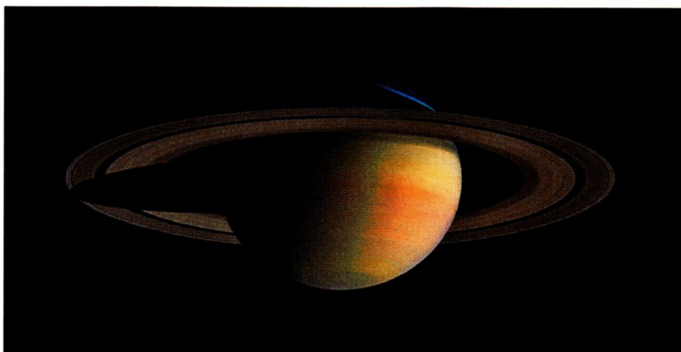
11.2.7 pav.

Dėl didelio nuotolio nuo Saulės Jupiteris gauna 27 kartus mažiau šilumos negu Žemė. Jupiterio debesų temperatūra žema, vos 135 K, tačiau daug aukštesnė už tą, kuri turėtų būti dėl Saulės kaitinimo. Tai rodo, kad Jupiteryje yra vidinių šilumos šaltinių.

Jupiterio tankis yra tik 1,33 g/cm^3, taigi 4 kartus mažesnis negu Žemės. Kieto paviršiaus Jupiteris neturi. Jį dengia molekulinio vandenilio vandenynas, po juo – metalinio vandenilio sluoksnis, centre – kietas silikatų, amoniako ir metano branduolys.

Jupiterio magnetinis laukas beveik 20 kartų stipresnis negu Žemės. Aplink Jupiterį skrieja 63 palydovai[1], jį juosia plonas smulkių kietų dalelių žiedas (jo plotis – apie 6000 km, storis – maždaug 1 km).

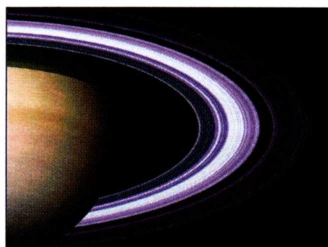
[1] 2005 m. duomenimis.



11.2.8 pav.

Saturnas

Saturnas priskiriamas prie didžiųjų Saulės sistemos planetų. Pagal dydį jis yra antroji planeta po Jupiterio (11.2.8 pav.), dangaus skliaute matoma kaip gelsva žvaigždė. Dėl mažo tankio ir didelio sukimosi apie ašį greičio Saturnas yra susiplojęs.



11.2.9 pav.

Saturno atmosferą sudaro molekulinis vandenilis (≈ 74 %), helis (≈ 24 %), metanas, amoniakas, etanas ir kitos dujos. Paviršių ištisai dengia amoniako kristalėlių debesys. Atmosferoje matomos tamsios ir šviesios juostos, lygiagrečios su pusiauju, tačiau jos yra ne tokios kontrastingos kaip Jupiteryje. Saturno atmosferoje pučia stiprūs vėjai, kurių greitis siekia iki 500 m/s. Toliau nuo pusiaujo vėjas pučia priešingomis kryptimis. Dėl to atmosferoje gausu sūkurių.

Kaip ir Jupiteris, Saturnas neturi kieto paviršiaus, vidine sandara panašus į Jupiterį. Viršutinis sluoksnis sudarytas iš skysto molekulinio vandenilio ir helio, po juo yra metalinio vandenilio sluoksnis, o centre – kietas silikatų, metano ir amoniako branduolys.

Saturnas turi kelis kartus stipresnį negu Žemė magnetinį lauką.

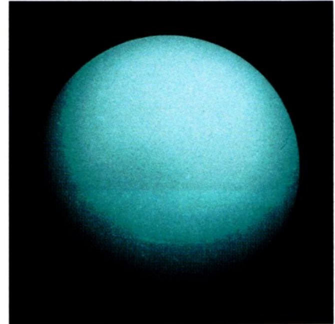
Unikalus reiškinys Saulės sistemoje – Saturno žiedai (11.2.9 pav.). 1610 m. juos pastebėjo Galileo Galilėjus. Jis manė, kad tai – Saturno palydovai. Tik 1656 m. Kristianas Heigensas įrodė, jog jie yra žiedai. Šiuo metu žinomi 7 pagrindiniai žiedai, sudaryti iš daugybės įvairaus dydžio ledo gabalėlių, kurie aplink planetą skrieja tarsi maži palydovai. Bendras žiedų plotis siekia daugiau kaip 400 000 km, o storis – vos 1 km.

2008 m. duomenimis, aptikti 56 Saturno palydovai. Didžiausias iš jų – Titãnas, dydžiu prilygstantis Mer-

kurijui. Titanas yra vienintelis Saulės sistemos planetų palydovas, turintis atmosferą. Aplink Saturną jau skrieja vienas dirbtinis palydovas „Cassini“. Iš jo tikimasi gauti daug informacijos apie Saturno žiedus. Manoma, kad jis padės atskleisti Saturno žiedų kilmę, taip pat priežastis, dėl kurių kiekvienas žiedas suskilęs į daugybę siaurų žiedelių ir turi tamsių properšų.

Uranas

Uranas – pirmoji Saulės sistemos planeta, atrasta pro teleskopą (11.2.10 pav.). 1781 m. kovo 13 d. ją aptiko vokiečių kilmės anglų astronomas Viljamas Heršelis (*William Herschel*, 1738–1822). Planeta pavadinta seniausio romėnų dievo Urano vardu. Uranas priskiriamas prie didžiųjų Saulės sistemos planetų, nors yra gerokai mažesnis už Jupiterį ir Saturną. Jį galima matyti tik pro teleskopą. Urano sukimosi ašis beveik sutampa su orbitos plokštuma, vadinasi, jis rieda šia plokštuma, tarytum gulėdamas ant šono. Apie Saulę Uranas apsisuka per 84 Žemės metus, todėl pusę planetos metų į Saulę būna atsuktas vienas ašigalis, kitą pusę metų – kitas. Tada vienoje pusėje būna ilga diena, kitoje – ilga naktis. Nors Saulė įvairias planetos vietas apšviečia nevienodai, beveik visame jos paviršiuje temperatūra yra apie 58 K. Uranas sukasi priešinga kryptimi negu dauguma kitų planetų (ta pačia kryptimi kaip Venera).



11.2.10 pav.

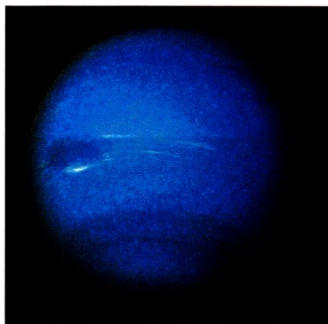
Uranas turi atmosferą, joje galima įžvelgti neryškių, lygiagrečių su pusiauju debesų juostų ir kitų nevienalyčių darinių. Urano atmosfera susideda daugiausia iš vandenilio (82 %), helio (15 %) ir metano (2 %), joje taip pat yra šiek tiek amoniako. Urano debesys sudaryti iš metano kristalėlių, sugeriančių raudonuosius ir geltonuosius saulės spindulius, todėl Urano atspindėtoje šviesoje vyrauja melsvos spalvos.

Pagal Urano sandaros modelį šios planetos paviršius yra vandens, amoniako ir metano vandenynas, kuriame giliau glūdi silikatų branduolys.

Uranas išspinduliuoja 30 % daugiau šilumos, negu jos gauna iš Saulės. Taigi planeta turi vidinį energijos šaltinį. Urano magnetinis laukas perpus silpnesnis negu Žemės.

Šiuo metu atrasti 27 Urano palydovai. Pusiaujo plokštumoje Uranas turi žiedų. Jie labai siauri, nuo kelių iki keleto dešimčių kilometrų. Visos žiedų sistemos plotis – apie 9000 km.

Neptūnas



11.2.11 pav.

Neptūnas – aštunta pagal nuotolį nuo Saulės planeta (11.2.11 pav.), nutolusi nuo jos už 30 av. Saulę ji apskrieja per 165 Žemės metus. Neptūnas plika akimi nematomas, jį galima stebėti tik pro teleskopą. Daug informacijos apie šią planetą 1989 m. pateikė automatinė stotis „Voyager 2".

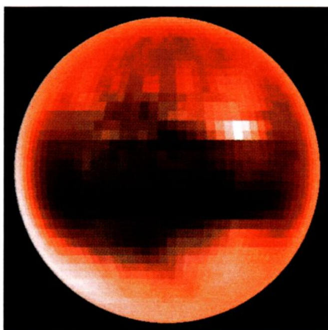
Neptūną gaubia tanki atmosfera, kurioje yra daug vandenilio, šiek tiek mažiau helio ir visai mažai metano. Neptūno skritulio paviršius byloja apie stiprią atmosferos srautų cirkuliaciją. Jo pietų pusrutulyje kurį laiką buvo matoma tamsi dėmė, dydžiu prilygstanti Žemei. Išnykstančios ir vis atsirandančios dėmės Neptūno atmosferoje rodo, kad čia siaučia uraganiniai vėjai, kurių kryptis kinta, o greitis siekia iki 400–700 m/s.

Manoma, kad Neptūno vidinė sandara turėtų būti panaši į Urano. Neptūno paviršių dengia plonas vandens, amoniako ir metano vandenynas, po juo giliau yra kietosios būsenos vandens, metano ir amoniako sluoksnis. Temperatūra planetos paviršiuje siekia 56 K.

Neptūnas turi silpnesnį negu Žemė magnetinį lauką. Šiuo metu yra žinoma 13 Neptūno palydovų. Atrasti keturi žiedai, kurie, kaip ir Urano, iš Žemės nematomi.

Plutonas, Cerera, Eridė

11.2.12 pav.



Plutonas yra nykštukinė Saulės sistemos planeta (11.2.12 pav.). Ją galima matyti tik pro didelį teleskopą. 1930 m. ją fotografiniu būdu atrado JAV astronomas Klaidas Tombas (*Clyde Tombaugh*). Žinių apie šią planetą gaunama tik stebint, nes nė vienas dirbtinis palydovas šios planetos dar nėra pasiekęs. Plutonas apskrieja Saulę per 248 Žemės metus.

Plutonas – maža planeta. Jos skersmens ilgis 2274 km, o masė sudaro tik 0,002 Žemės masės. Taigi Plutoną dydžiu lenkia net septynių planetų palydo-

vai, tarp jų ir Mėnulis. Atmosfera labai reta, sudaryta iš metano, anglies monoksido ir azoto. Planetos paviršių dengia kietas minėtų dujų sluoksnis. Jo temperatūra – apie 40 K.

Plutonas turi 3 palydovus. Didžiausias jų – Charonas, atrastas 1978 m. Plutonas ir Charonas visą laiką yra atsisukę vienas į kitą ta pačia puse ir skrieja aplink bendrą masės centrą. Charono masė apie 6,5 karto mažesnė negu Plutono. Taigi palydovas mažai skiriasi nuo centrinio kūno. Todėl Plutonas dar vadinamas dvinare planeta. Tačiau abiejų kūnų paviršiaus cheminė sudėtis skiriasi. Charono paviršiaus spektre vyrauja kieto vandens požymiai, kurių nėra Plutono spektre. Manoma, kad šie du kūnai susidarė atskirai ir tik vėliau priartėję susijungė.

Cerera – nykštukinė planeta, iki 2006 m. laikyta asteroidu Nr. 1. Jį 1801 m. sausio 1 d. atrado Džuzepė Pjacis (*Giuseppe Piazzi*, 1746–1826) iš Palermo. Pastebėtas šviesulys buvo pavadintas Sicilijos globėjos deivės Cereros vardu. 2006 m. astronomų sprendimu Cerera priskirta nykštukinių planetų grupei.

Eridė – 2003 m. spalio 21 d. atrastas dangaus kūnas. Manoma, kad jo skersmuo yra šiek tiek didesnis nei Plutono. Atradus Eridę, buvo patobulinta ankstesnė Saulės sistemos planetų klasifikacija. Ji papildyta nauja nykštukinių planetų grupe.

Klausimai ir užduotys

1. Išvardykite Saulės sistemos planetas jų išsidėstymo nuo Saulės tvarka.

2. Kokie požymiai būdingi Žemės grupės planetoms; didžiosioms planetoms?

3. Kaip atrodo Saturno žiedas, stebimas iš Saturno pusiaujo ir iš ašigalių?

4. Apskaičiuokite greitį, kurio pakaktų erdvėlaiviui išskristi iš Marso. (5 km/s)

5. Tardami, kad Urano sukimosi ašis yra jo orbitos plokštumoje, aprašykite, kaip keičiasi jo diena ir naktis, taip pat metų laikai. Planetos sukimosi apie ašį periodas lygus 17,23 h, o skriejimo aplink Saulę periodas – 84 Žemės metams.

6*. Tarkime, kad Žemė ir Neptūnas yra maždaug vienoje tiesėje tarp Saulės ir artimiausios žvaigždės. Kiek šviesesnė atrodytų žvaigždė, jeigu į ją žiūrėtume iš Neptūno, o ne iš Žemės?

7. Veneros masė $4{,}9 \cdot 10^{24}$ kg, spindulio ilgis 6100 km. Apskaičiuokite pirmąjį kosminį greitį prie Veneros paviršiaus. (7,3 km/s)

11.3. Žemė – mūsų planeta

Pagrindinės sąvokos

Vidìnis branduolỹs,
išorìnis branduolỹs,
mántija,
plutà,
tektòniniai judesiaĩ,
hidrosferà,
atmosferà,
biosferà.

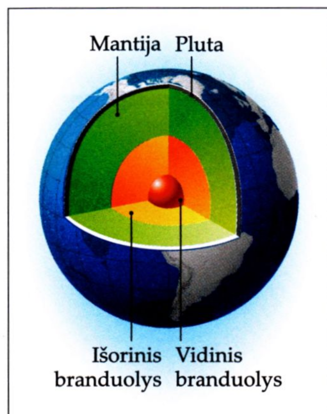
Vidinė Žemės sandara

Nagrinėjant seisminių bangų plitimą, nustatyta, kad Žemės rutulys susideda iš keleto sluoksnių. Kietas viršutinis sluoksnis vadinamas ***plutà*** (11.3.1 pav.). Ją sudaro sustingusios lavos produktai: granitai ir bazaltai. Po vandenynu plutos storis siekia 5–10 km, žemynuose – 35–70 km. Plutoje randama visų cheminių elementų, esančių periodinėje elementų lentelėje. Jie sudaro įvairius junginius, iš kurių daugiausia yra silicio ir aliuminio oksidų (SiO_2 ir Al_2O_3). Deguonis, silicis ir aliuminis sudaro net 84 % Žemės plutos masės.

Po pluta slūgso kitas sluoksnis – ***mántija*** (gr. *mantion* – apsiaustas). Ji dar skirstoma į viršutinę ir apatinę. Temperatūra mantijos viršuje 1300 K, apačioje 3800 K. Apatinė mantijos riba yra 2900 km gylyje. Ji susideda iš magnio ir geležies silikatų.

Po Žemės mantija yra 2200 km storio skystas sluoksnis, vadinamas ***išoriniù bránduoliu***. Jo viduje glūdi 1250 km spindulio kietas ***vidìnis branduolỹs***. Manoma, kad branduolyje daugiausia yra geležies ir nikelio. Einant gilyn, medžiagos tankis, slėgis ir temperatūra didėja. Spėjama, jog Žemės branduolyje temperatūra siekia 6000–7000 K. Žemės gelmės įkaito tolimoje praeityje, dabar jų energiją palaiko radioaktyviųjų elementų skilimas, tankesnių medžiagų grimzdimas.

11.3.1 pav.



Žemės forma, dydis ir paviršius

Žemė yra didžiausia Žemės grupės planeta. (Primename, kad šiai grupei dar priklauso Merkurijus, Venera ir Marsas.) Jau žinote, kad Žemė panaši į suplotą rutulį, vadinamą geoidù (žr. „Fiziką 11", išplėstinio kurso antrąją knygą, p. 70). Geoidas primena elipsoidą (erdvinį kūną, kuris gaunamas sukant elipsę apie mažąją jos ašį). Ilgiausio (pusiaujinio) Žemės spindulio ilgis lygus 6378,140 km, trumpiausio (ašigalinio) – 6356,755 km. Žemės masė $5{,}974 \cdot 10^{24}$ kg, o vidutinis tankis 5515 kg/m^3.

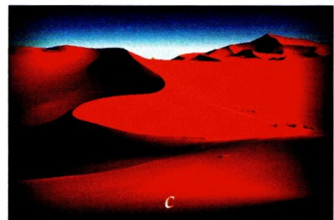
Žemės paviršių (11.3.2 pav., *a, b* ir *c*) formavo tiek vidiniai, tiek išoriniai procesai. Vidinių procesų metu atsirado žemynai, vandenynų daubos, kalnų grandinės, vulkanai, slėniai ir kiti paviršiaus dariniai. Vidiniai procesai Žemėje nesiliauja. Manoma, kad Žemės mantijoje vyksta konvekcijos reiškiniai. Kylančios ir nusileidžiančios mantijos srovės veikia Žemės plutą ir ši keičiasi. Žemės plutos keitimasis vadinamas ***tektòniniais*** (gr. *tektonikē* – statybos menas) ***judesiaĩs***. Spėjama, kad prieš 220 mln. metų visi žemynai buvo vienoje vietoje ir sudarė Pangéją. Judant mantijai, Pangėja suskilo ir žemynai atitolo vienas nuo kito. Žemynai juda ir dabar. Šiáurės Amèrika per metus nuo Euròpos nutolsta 1–2 cm. Pietũ Amèrika tolsta nuo Ãfrikos.

Ten, kur vyksta tektoniniai judesiai, t. y. kur žemyninės plokštės persiskiria arba susiduria, galimi žemės drebėjimai. Jie sugriauna miestus, kaimus, kelius

11.3.2 pav.


a


b


c



11.3.3 pav.



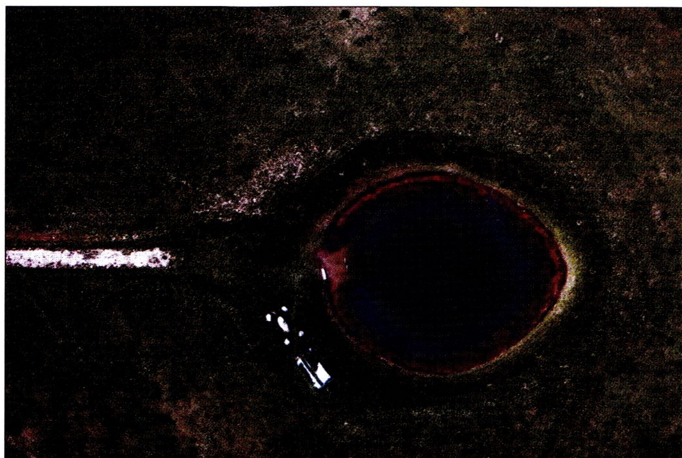
11.3.4 pav.

(11.3.3 pav.). Žmogaus gyvybei grėsmė iškyla, kai drebėjimas pasiekia 6–8 balus pagal Richterio skalę. Lietuvojè paskutinis žemės drebėjimas vyko 2004 m. rugsėjo 21 d. 17 valandą. Tada pirmasis smūgis siekė 4 balus, antrasis – 5,3 balo. Žemyninių plokščių susidūrimo vietoje iškyla kalnai, pro plyšius veržiasi magma (11.3.4 pav.), susidaro vulkanai, vyksta žemės drebėjimai.

Žemės paviršių formuoja ir išoriniai procesai. Žemėje, kaip ir kituose kietą paviršių turinčiuose Saulės sistemos kūnuose, yra daugybė apvalių darinių – kraterių (11.3.5 pav.). Dauguma jų susidarė dėl meteoritų (apie juos kalbėsime vėliau) smūgių. Jeigu paviršius neyra, nėra tektoninių smūgių, krateriai išsilaiko milijardus metų. Žemės paviršiuje randama tik jaunų kra-

11.3.5 pav.





11.3.6 pav.

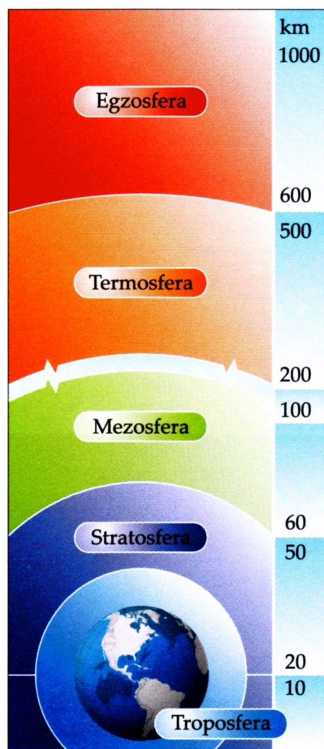
terių, senus panaikino vėjas, krituliai, ledynai, vanduo ir biologiniai procesai. Manoma, kad išoriniai procesai Žemės paviršių pakeičia per 500 mln. metų.

Žemės paviršiaus kitimų matome ir savo krašte. Pãsvalio ir Bir̀žų rajonuose, ištirpus gipso klodams ir uolienoms įgriūvant į požemines ertmes, atsiranda kárstinių įgriuvų, arba smẽgduobių (11.3.6 pav.). Gipso klodų tirpimą lėmė ledynmetis. Slenkantis ledynas didino plyšius tarp gipso klodų. Juose šąlant vandeniui, uoliena aižėdavo, atsirasdavo naujų plyšių. Jais galėjo cirkuliuoti tirpstant ledynui susidaręs vanduo. Taip formavosi požeminiai vandens kanalai, tuštumos. Paskutinį lemiamą poveikį karstinių įgriuvų formavimuisi turi skliauto uolienų svoris, padidėjusi drėgmė ir išorinės apkrovos. Vietomis slūgsančiuose gipsinių dolomitų sluoksniuose karstiniai reiškiniai vyksta ir dabar. Karstinis kraštovaizdis ryškiausias ties Pãsvaliu, taip pat į šiaurę ir į vakarus nuo Bir̀žų (Kirdonių̃, Drąseĩkių, Pãbiržės ir kituose kaimuose).

Hidrosfera

Trūkus vandens apvalkalas vadinamas ***hidrosferà*** (gr. *hydōr* – vanduo, *sphaira* – rutulys). Žemė yra vienintelė Saulės sistemos planeta, turinti skysto vandens. Jūros ir vandenynai sudaro 70,8 % viso Žemės paviršiaus, sausuma teužima 28,2 %. Žemės hidrosfera susideda iš vandenynų, jūrų, sausumos, vidaus ir požeminių vandenų, sniego ir ledynų dangos. Manoma, kad hidrosferoje atsirado gyvybė.

Žemės atmosfera



11.3.7 pav.

Žemę gaubiantis oro sluoksnis, besisukantis kartu su Žeme, vadinamas ***atmosferà*** (gr. *atmos* – garai). Visos atmosferos masė yra 5,15 · 10^{15} t. Žemės atmosferoje daugiausia yra azoto (78,08 %) ir deguonies (20,95 %), taip pat argono, anglies dioksido, labai mažai – neono, helio, metano, vandenilio ir kitų dujų. Palyginus Žemės ir Veneros bei Marso atmosferos sudėtį, matyti, kad Žemės atmosferoje yra labai mažai anglies dioksido (CO_2). Tačiau čia visada esti vandens garų. Arti Žemės paviršiaus jų telkiasi daug, 10–15 km aukštyje – labai mažai. Kondensuodamiesi garai virsta vandens lašeliais arba ledo kristalėliais – susidaro debesys.

Vertikalia kryptimi Žemės atmosfera skirstoma į šiuos sluoksnius: troposfèrą, stratosfèrą, mezosfèrą, termosfèrą ir egzosfèrą (11.3.7 pav.; žr. „Fiziką 11“, išplėstinio kurso antrąją knygą, p. 133).

- Troposfera (gr. *tropos* – posūkis) yra apatinis, tankiausias, atmosferos sluoksnis, sudarantis 80 % visos atmosferos masės. Jis tęsiasi nuo Žemės paviršiaus 12–18 km. Šiame sluoksnyje susikaupę beveik visi atmosferos vandens garai ir dulkės, todėl čia susidaro debesys, vyksta kiti meteorologiniai reiškiniai. Vidutinė temperatūra troposferos viršuje siekia 218 K.
- Stratosfera (lot. *stratum* – sluoksnis) – virš troposferos, 20–30 km aukštyje nuo Žemės paviršiaus, esantis atmosferos sluoksnis. Jame daugiausia yra atmosferos ozono (O_3). 20–25 km aukštyje jo koncentracija didžiausia. Ozono sluoksnis sugeria ultravioletinę saulės spinduliuotę, todėl stratosferos oras šyla.
- Mezosfera (gr. *mesos* – tarpinis, vidurinis) – jonizuotas atmosferos sluoksnis. Kylant į viršų, temperatūra jame krinta ir 80–85 km aukštyje pasiekia mažiausią vertę, lygią 190 K.
- Termosfera (gr. *thermos* – karštas) – virš mezosferos esantis jonizuotas atmosferos sluoksnis. Kylant aukštyn, termosferos temperatūra didėja. Maždaug 400 km aukštyje ji pasiekia 1500 K ir toliau beveik nekinta. Viršutinis mezosferos sluoksnis ir termosfera dar vadinama jonosfera (gr. *iōn* – einantis). Jonosferoje dujų atomus jonizuoja Saulės ultravioletiniai bei rentgeno spinduliai ir dalelių srautas (Saulės vėjas). Jonosferoje susidaro šiaurės ir pietų pašvaistė, žybsi

į atmosferą įlėkę meteorai. Jonosfera atspindi ilgesnes negu 15 m radijo bangas, todėl sudaro galimybę naudotis tolimu radijo ryšiu.

- Egzosfera (gr. *exō* – išorėje) yra išorinis labai retas atmosferos sluoksnis. Ji prasideda 800 km aukštyje. Atominio vandenilio pėdsakų aptinkama net 100 000 km aukštyje nuo Žemės paviršiaus. Ryškios viršutinės ribos atmosfera neturi.

Atmosfera atspindi arba sugeria daugumą spinduliuotės, ateinančios į Žemę iš kosminės erdvės. Ji nepraleidžia iš Saulės sklindančios kenksmingos rentgeno spinduliuotės, saugo Žemę nuo meteorų ardomojo kosminės spinduliuotės poveikio. Svarbų vaidmenį ji vaidina palaikydama Žemėje šilumos balansą. Regimoji Saulės spinduliuotė ją gali pereiti beveik nesusilpnėjusi. Sugerdamas ją, Žemės paviršius įšyla ir skleidžia infraraudonąją spinduliuotę.

Biosfera

Žemė – vienintelė Saulės sistemos planeta, kurioje egzistuoja augmenija ir gyvūnija. Ta Žemės rutulio dalis, kurioje gyvena organizmai, vadinama ***biosferà*** (gr. *bios* – gyvybė, gyvenimas). Kur prasideda ir kur baigiasi biosfera? Ją sudaro 2–3 km gylio viršutinis plutos sluoksnis, hidrosfera ir dalis atmosferos (10–15 km).

Žemės magnetinis laukas

Žemė turi stiprų magnetinį lauką. Apie jį daug sužinojote mokydamiesi fizikos šiais mokslo metais (žr. „Fiziką 12", išplėstinio kurso pirmąją knygą, p. 64).

Klausimai ir užduotys

1. Apibūdinkite vidinę Žemės sandarą. Palyginkite ją su kitų planetų vidine sandara.

2. Ką vadiname tektoniniais judesiais? Kokie yra jų padariniai? Pateikite pavyzdžių.

3. Kas formuoja Žemės paviršių? Atsakymą pagrįskite.

4. Ką vadiname hidrosfera?

5. Išvardykite Žemės atmosferos sluoksnius. Trumpai juos apibūdinkite (aukštis, temperatūra, slėgis, sudėtis).

6. Ką vadiname biosfera?

7. Žemės sukimasis apie ašį per šimtmečius pamažu lėtėja. Kaip vyks astronominiai reiškiniai – greičiau ar lėčiau, jeigu laikas bus matuojamas laikrodžiais, reguliuojamais pagal Žemės sukimąsi?

8. Žemės orbita artima apskritimui, kurio spindulio ilgis 149 600 000 km. Žemės skriejimo ja periodas lygus 365,25 paros. Kokiu greičiu Žemė skrieja aplink Saulę?

(≈ 30 km/s)

9. Sekundinės svyruoklės ilgis 991,03 mm. Apskaičiuokite laisvojo kritimo pagreitį Žemės pusiaujyje.

(9,781 m/s^2)

10. Kiek pailgėtų metai, jei atstumas nuo Žemės iki Saulės padidėtų 1 m? Tarkite, kad Žemės orbitinis greitis nesikeičia.

$\left(\frac{1}{5000}\text{ s}\right)$

11.4. Mėnulis – Žemės palydovas

Pagrindinės sąvokos

Sinòdinis ménuo,
žvaigždìnis (sidèrinis) ménuo,
jáunatis,
príešpilnis,
pìlnatis,
delčià.

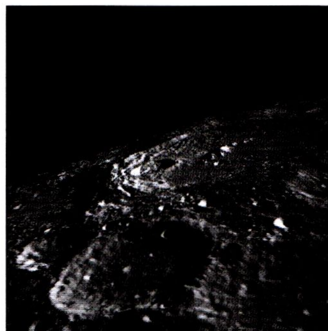
Fizinės Mėnulio savybės

Mėnulis yra vienintelis gamtinis Žemės palydovas ir artimiausias Žemei kosminis kūnas. Jį jau aplankė žmonės. Pirmieji Mėnulyje 1969 m. liepos 21 d. išsilaipino JAV astronautai Nilas Oldenas Armstrongas (*Neil Alden Armstrong*) ir Edvinas Oldrinas (*Edwin Aldrin*). Iš viso Mėnulyje yra pabuvoję 12 JAV astronautų, nusileidę 60 skirtingų šalių (JAV, buvusios TSRS ir Japònijos) erdvėlaivių. Jais į Žemę atkeliavo 382 kg Mėnulio grunto pavyzdžių.

Mėnulio forma artima rutuliui, kurio spindulio ilgis 1738 km, masė 81,3 karto mažesnė negu Žemės, o tankis lygus 340 kg/m^3. Net plika akimi Mėnulio paviršiuje galima įžiūrėti šviesesnių ir tamsesnių sričių (11.4.1 pav.). Tamsiosios nuo seno vadinamos jūromis. Žinote, kad jos visai nepanašios į Žemės jūras,



11.4.1 pav. © Luc Viatour



11.4.2 pav.

nes Mėnulyje nėra vandens. Mėnulio jūromis vadinamos žemumos. Didžiausia Mėnulio žemuma – Audrų vandenýnas. Jūros apima net apie 40 % matomos Mėnulio pusės. Šviesios Mėnulio sritys yra aukštumos ir vadinamos žemynais. Jų paviršius labai skiriasi. Pro teleskopą galima stebėti ir smulkesnius Mėnulio paviršiaus darinius: kraterius, kalnagūbrius, slėnius (11.4.2 pav.). Žiediniai kalnai arba krateriai – būdingiausi Mėnulio paviršiaus dariniai. Didesnius kraterius sudaro žiedo formos pylimas stačiais šlaitais ir plokščiu dugnu. Kraterio dugno centre matomas kauburėlis – vientisa kalnų grupė. Pačių didžiausių Mėnulio kraterių skersmens ilgis siekia apie 250 km.

Mėnulio paviršiuje yra labai daug mažų kraterių. Jų forma primena piltuvą. Dauguma kraterių yra žemynuose, tačiau pasitaiko ir jūrose. Nuo kai kurių driekiasi šviesūs spinduliai. Manoma, kad tai gali būti maži krateriai, geriau atspindintys saulės šviesą. Didesni Mėnulio krateriai pavadinti įžymių žmonių vardais, trys iš jų – Vìlniaus astronomų Vaclavo Dzevulskio, Jono Sniadeckio ir Martyno Počobuto vardais. Mėnulio paviršius vaizduojamas mėnlapiuose (11.4.3 pav.). Pirmieji mėnlapiai sudaryti dar Galilėjaus laikais.



11.4.3 pav.

Mėnulio paviršių geriausia tirti tada, kai tiriama sritis yra prie Mėnulio dieninio ir naktinio pusrutulio ribos. Tuo metu nelygumai, apšviesti Saulės, meta ilgus šešėlius ir juos galima puikiai stebėti. Manoma, kad Mėnulio paviršiaus formavimuisi turi įtaką tiek išorinės, tiek vidinės jėgos. Vidinių jėgų pavyzdys – Mėnulyje vykstantys tektoniniai judesiai, vulkaniniai reiškiniai. 1958 m. Alfonso krateryje pastebėtos iš Mėnulio gelmių besiveržiančios dujos. Šiame dangaus

kūne įrengti jautrūs seismografai registruoja silpnus Mėnulio drebėjimus, kuriuos sukelia meteoritų smūgiai, didelio temperatūros svyravimo sukeltas uolienų plėtimasis ir traukimasis.

Maži meteoritai, nuolat atsitrenkdami į Mėnulį, gludina jo paviršių. Smulkios skeveldros vakuumo sąlygomis nevirsta dulkėmis, bet susilydo į akytą sluoksnį, panašų į šlaką. Tamsios Mėnulio sritys sudarytos iš bazáltų (magnio ir geležies silikatų), šviesios – iš anortozìtų (aliuminio ir kalcio silikatų).

Mėnulis neturi atmosferos. Vadinasi, jame nėra nei debesų, nei vandens, nei rūkų, nei vaivorykštės, nei aušros, nei žaros. Šešėliai Mėnulyje aštrūs ir juodi, paviršius neapsaugotas nuo rentgeno spinduliuotės ir dalelių srautų, kurie pavojingi gyvybei. Temperatūra Mėnulio paviršiuje labai smarkiai svyruoja. Vidurdienį į Saulę atsuktoje pusėje ji siekia 120 °C, naktį nukrinta iki –170 °C.

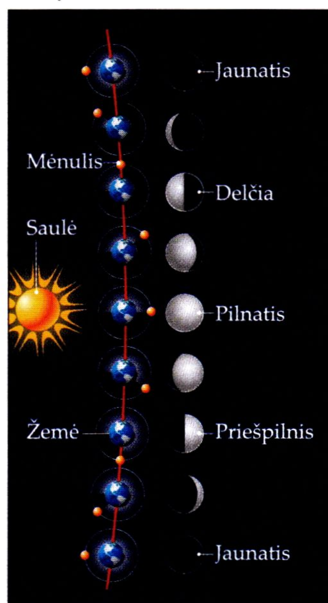
Mėnulis turi silpną, 1000–100 000 kartų silpnesnį negu Žemė, magnetinį lauką.

Mėnulio judėjimas

Mėnulis skrieja aplink Žemę elipsės formos orbita: mažiausias jo atstumas iki Žemės lygus 363 300 km (šis taškas vadinamas perigė̃jumi), didžiausias – 405 500 km (šis taškas vadinamas apogė̃jumi). Mėnulis juda aplink Žemę ta pačia kryptimi, kuria ši sukasi apie savo ašį.

Žvaigždžių atžvilgiu Mėnulis apskrieja Žemę per 27,3 paros. Šis laiko tarpas vadinamas ***žvaigždiniù***, arba ***sidèriniu, mė́nesiu*** (lot. *sidus* – žvaigždė). Per tiek laiko jis apsisuka ir apie savo ašį. Dėl šios priežasties iš Žemės visada matoma ta pati Mėnulio pusė. 1959 m. pirmą kartą iš kosminės stoties buvo nufotografuota kita jo pusė. Nuo matomosios ji skiriasi tuo, kad čia mažiau jūrų. Šiuo metu, remiantis gausybe nuotraukų, sudaryti nematomos Mėnulio pusės mėnlapiai.

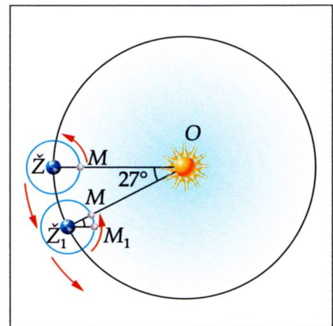
11.4.4 pav.



Saulės atžvilgiu Mėnulis apskrieja Žemę per 29,5 paros. Šis laiko tarpas vadinamas ***sinòdiniu mė́nesiu*** (gr. *synodos* – jungtis, suartėjimas). Mėnulio para lygi vienam sinodiniam mėnesiui. Diena Mėnulyje trunka dvi mūsų savaites, tiek pat laiko – ir jo naktis. Sinodinis mėnuo – tai laiko tarpas tarp dviejų vienodų

Mėnulio fazių. Jas jau žinote: ***jáunatis, priešpilnis, pil̀natis, delčià*** (11.4.4 pav.).

Mėnulio siderinio ir sinodinio mėnesio trukmė skiriasi. Norėdami paaiškinti šį skirtumą, remsimės 11.4.5 paveikslu. Per parą Mėnulis M savo orbita nuskrieja lanką, kuris atitinka 360° : 27,3 ≈ 13°. Per 27,3 paros Žemė $Ž$ drauge su Mėnuliu savo orbita Saulės atžvilgiu nukeliauja lanką $ŽŽ_1$, kurį atitinka beveik 27° centrinis kampas. Kad Mėnulis atsirastų toje pačioje vietoje Saulės atžvilgiu, jam reikia papildomai laiko lankui MM_1 įveikti. Tą laiką apskaičiuojame taip: 27° : 13° ≈ 2. Vadinasi, reikia dar beveik 2 parų. Todėl saulinė Mėnulio para lygi apie 29,5 mūsų paros.



11.4.5 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Apibūdinkite Mėnulio paviršių, išorinių ir vidinių jėgų įtaką jo formavimuisi.

2. Ar būtų galima susikalbėti Mėnulyje? Atsakymą pagrįskite.

3. Ką vadiname žvaigždiniu mėnesiu; sinodiniu mėnesiu?

4. Kokios Mėnulio fazės metu gali vykti Saulės užtemimai; Mėnulio užtemimai? Atsakymą pagrįskite.

5. Kodėl Saulės ir Mėnulio užtemimai nevyksta kas mėnesį?

6. Ar galima Mėnulyje matyti Žemės jaunatį? Atsakymą pagrįskite.

7. Ar galima Mėnulyje matyti poliarines pašvaistes?

8. Stebimas iš Žemės, Mėnulis užteka per 2 min. Per kiek laiko užteka Žemė, stebima iš Mėnulio?

9. Kodėl iš Žemės matoma tik viena Mėnulio pusė?

10. Kai Mėnulį matome lyg siaurą pjautuvą, kita jo disko dalis truputį šviečia (11.4.6 pav.). Šis reiškinys vadinamas pelenine šviesa. Paaiškinkite, kaip ji atsiranda.

11.4.6 pav.



11. Ar galėtų astronautas Mėnulyje naudotis kompasu? Atsakymą pagrįskite.

12. Apskaičiuokite Mėnulio vidutinį orbitinį greitį. Tarkime, kad Mėnulio orbita yra apskrita, o vidutinis nuotolis nuo Žemės lygus 384 000 km. (1,02 km/s)

11.5. Asteroidai, kometos, meteorai ir meteoritai

Pagrindinės sąvokos

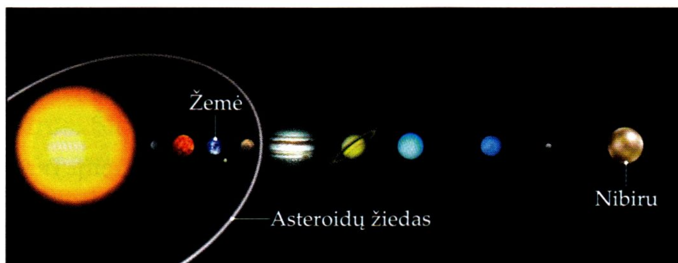
Asteròidas,
asteròidų žíedas,
kometà,
meteoròidas,
meteòras,
meteori̇̀tas,
astroblemà.

Asteroidai

Asteroidai – mažieji dangaus kūnai. Jau žinote (žr. 11.2 temą), kad pirmasis asteroidas buvo atrastas 1801 m. Jis pavadintas Cererà. Netrukus paaiškėjo, kad tokių mažų dangaus kūnų yra ne vienas. Daug jų aptikta XIX a. pabaigoje, o šiuo metu yra žinoma apie 30 000. Mažosios Saulės sistemos planetos vadinamos ***asteròidais*** (gr. *aster* – žvaigždė, *eidos* – pavidalas). Danguje jos atrodo kaip žvaigždės, be mažiausio skritulėlio. Tai liudija, kad asteroidai yra maži. Mažiausių asteroidų, kurių skersmens ilgis siekia apie 1 km, gali būti šimtai tūkstančių, didesnių yra mažiau. Iš visų žinomų asteroidų tik 14-os skersmens ilgis didesnis kaip 250 km. Pirmojo pastebėto asteroido – Cereros – skersmens ilgis siekia 950 km. Dauguma asteroidų skrieja tarp Marso ir Jupiterio orbitų (11.5.1 pav.). Ši asteroidų juosta vadinama ***asteròidų žíedu***. Atrastiems asteroidams suteikiami vardai. Kai kurie iš jų turi lietuviškus vardus: Vi̇̀lnius, Lietuvà, Čiurliónis, Kaũnas, Molétai, Straižỹs, Ažùsienis, Bartkẽvičius.

Asteroidai yra netaisyklingos formos luistai, uolų skeveldros. Žinių apie jų paviršių gauname iš erdvėlaivių. Perduoti vaizdai liudija, kad asteroidų paviršius nusėtas kraterių. Kai kurie jų ypač dideli. Antai Mati̇̀ldos asteroido matmenys yra 57 km × 53 km × × 50 km, o kraterio skersmens ilgis siekia net 30 m (11.5.2 pav.).

11.5.1 pav.



Asteroidai – nerutuliški kūnai. Sukdamasis netaisyklingos formos luistas skirtingai atspindi saulės šviesą. Todėl asteroidų spindesys nuolat kinta.

Kaip atsirado asteroidai, kol kas nežinoma. Iškeltos dvi hipotezės. Pasak vienos, asteroidai yra suskilusių planetų[1] skeveldros, pasak kitos, – medžiaga, negalinti susilieti į vientisą darinį dėl galingos kaimyninio Jupiterio traukos.

Su kai kurių asteroidų judėjimu orbitomis susipažinote mokydamiesi fizikos XI klasėje (žr. „Fiziką 11", išplėstinio kurso pirmąją knygą, p. 107).



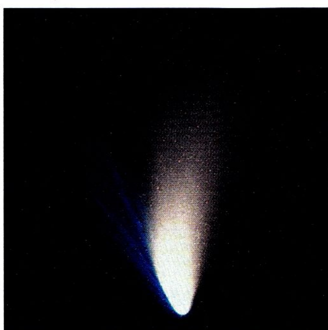
11.5.2 pav.

Kometos

Keisto pavidalo, turintys uodegą dangaus kūnai vadinami ***komètomis*** (gr. *kometes (aster)* – uodegota (žvaigždė); 11.5.3 pav.). Šie dangaus kūnai tokį pavidalą įgauna priartėję prie Saulės. Būdamos toli nuo jos, kometos atrodo kaip silpnos beformės šviesios dėmės su branduoliu centre (11.5.4 pav.). Kometos stebėjimas iš Žemės priklauso nuo jos matomumo sąlygų: atstumo iki jos, kampinio nuotolio nuo Saulės, Mėnulio šviesos ir kt. Plika akimi kometą galima pamatyti kas 10–15 metų. Kometų pasirodymas ilgai buvo siejamas su nelaimėmis, karais.

Kometos skrieja aplink Saulę įvairiomis orbitomis (žr. „Fiziką 11", išplėstinio kurso pirmąją knygą, p. 106). Judančios elipsėmis Saulę apskrieja periodiškai. Kai kurių kometų skriejimo aplink Saulę periodas labai ilgas, ilgesnis negu 200 metų. Tokios kometos vadinamos ***ilgaperiòdėmis***, arba ***vienkartìnėmis***. Kometos, kurių skriejimo aplink Saulę periodas trumpesnis negu 200 metų, vadinamos ***trumpaperiòdėmis***.

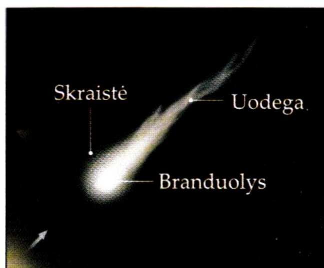
11.5.3 pav.



11.5.4 pav.



[1] Nibiru (žr. 11.5.1 pav.) reiškia „perkertanti". Spėjama, kad tai nežinoma X planeta, kurios orbita elipsinė ir labai ištęsta; šiuo metu ši planeta yra itin toli nuo Žemės. Pasak šumerų legendos, Žemė tėra pusė planetos, vadintos Tiamate. Antra jos pusė nuskilo po susidūrimo su kita planeta – Nibiru (10-ąja, arba X, planeta). Iš Tiamatės nuolaužų galėjo susidaryti asteroidų žiedas.



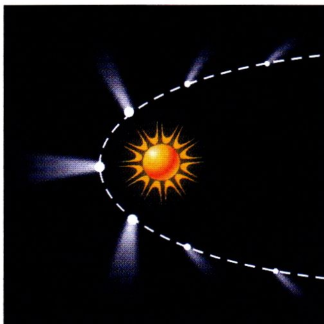
11.5.5 pav.

Jų pavyzdys – Hālio kometa, iš Žemės matoma kas 76 metai. Paskutinį kartą ji pasirodė 1986 m.

Kometų priartėjimas prie Žemės ir būsimasis regimasis jų kelias dangaus skliautu iš anksto tiksliai apskaičiuojamas. Kasmet pranešama apie kelių dar nežinomų kometų pasirodymą. Naujos kometos pavadinamos jas atradusių astronomų ar astronomijos mėgėjų vardais. 1980 m. liepos 31 d. Vìlniaus universiteto studentai Kazimieras Černis ir Jovaras Petrauskas pastebėjo naują kometą. Ji buvo pavadinta Černio-Petrausko kometa.

Tipinę kometą sudaro šviesus branduolys, apsuptas į kraštus silpnėjančios skraistės, arba komos, ir iš jos nutįsusio šleifo – kometos uodegos (11.5.5 pav.). Branduolys yra vienintelė kieta kometos dalis. Tai 1–50 km skersmens luistas, sudarytas iš sušalusių dujų (vandens, anglies dioksido, amoniako, metano), dulkių, kietosios medžiagos gabaliukų. Daug informacijos apie Halio kometos branduolį 1986 m. pateikė erdvėlaiviai. Pirmą kartą mokslo istorijoje buvo gautas kieto kometos branduolio vaizdas. Paaiškėjo, kad ledų luisto paviršius yra tamsus, padengtas kietomis dalelėmis, likusiomis išgaravus ledui. Pro plutos angas ir plyšius veržiasi vandens garai ir kitos dujos, taip pat anglies dulkės. Kometai priartėjus prie Saulės, branduolys įkaista, iš jo išsiskiria dujos ir dulkės, kurios apgaubia jį dujine skraiste. Branduolys ir skraistė sudaro kometos galvą. Iš Žemės skraistė matoma kaip blyški dėmelė. Iš kometos branduolio išmetamos dujos ir dulkės. Saulės šviesos slėgio ir atominių dalelių srautų stumiamos tolyn nuo Saulės, jos ir sudaro kometos uodegą. Kuo arčiau Saulės skrieja kometa, tuo ji šviesesnė ir tuo ilgesnė jos uodega (11.5.6 pav.), nes Saulės spinduliai stipriau įkaitina kometą ir dėl to iš jos gausiau skiriasi dujos. Kometos galvos ir uodegos sudėtis tiriama spektrine analize. Ji rodo, kad kometos galvoje daugiausia yra anglies ir ciano garų, o uodegoje – jonizuotų anglies oksido molekulių.

11.5.6 pav.



Pagal olandų mokslininko Jano Hendriko Orto (*Jan Hendrik Oort*) hipotezę kometos sudaro milžinišką debesį, nutįsusį už Plutono orbitos ribų. Dauguma kometų atskrieja iš Saulės sistemos pakraščių. Stipri Jupiterio trauka ilgaperiodes kometas gali paversti trumpaperiodėmis.

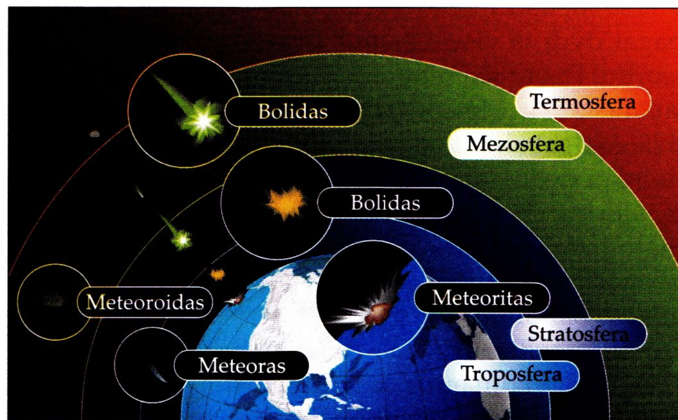
Meteorai ir meteoritai

Periodinių kometų branduoliai, kiekvieną kartą skriedami pro Saulę, spindi vis silpniau. Pastebėta, kad ilgainiui jie pasidalija į dvi ar daugiau dalių, sudarydami meteoroidų srautą. ***Meteoròidai*** (gr. *meteōron* – atmosferos reiškinys, *eidos* – pavidalas) – kosminėje erdvėje skriejantys nedideli (nuo kelių mikrometrų iki kelių šimtų metrų dydžio) kietieji kūnai (11.5.7 pav.). Meteoroidai yra kometų liekanos, jie gali būti ir asteroidų nuolaužos.

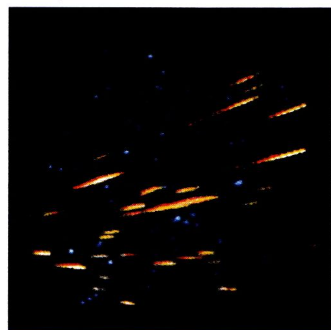
Kai Žemė patenka į meteoroidų srautą, giedrą naktį dangaus skliaute galima pamatyti trumpalaikius žybsnius, primenančius žvaigždžių kritimą (11.5.8 pav.). Tokį reiškinį buityje įprasta vadinti krintančiomis žvaigždėmis. Krintančios žvaigždės įspūdį sukelia dideliu greičiu (11–72 km/s) į Žemės atmosferą įlėkęs meteoroidas. Dėl trinties į atmosferą jis smarkiai įkaista, lydosi ir išgaruoja virsdamas švytinčiu ***meteorù***, arba ***bolidù*** (gr. *bolis* (kilm. *bolidos*) – svaidomoji ietis). Silpni plika akimi nematomi meteorai įsižiebia 140–160 km aukštyje, vidutiniai matomi – 80–110 km aukštyje, lėti šviesūs – 60–80 km aukštyje (žr. 11.5.7 pav.).

Paprastai būrys meteorų išlekia tarytum iš vieno taško, esančio kuriame nors žvaigždyne. Toks jų srautas vadinamas pagal žvaigždyną, kuriame yra tas taškas. Žymiausi meteorų srautai yra du: perseìdai, pasirodantys liepos pabaigoje ir rugpjūčio pradžioje iš Persėjo žvaigždyno, ir leonìdai, lapkričio viduryje pasipilantys iš Liũto žvaigždyno.

11.5.7 pav.

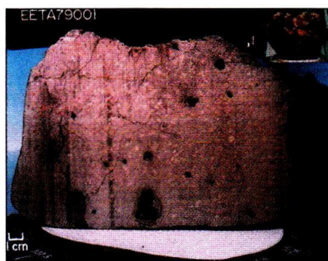


11.5.8 pav.



Ant Žemės kasdien nukrinta tūkstančiai tonų meteorinės medžiagos. Pasiekęs Žemę meteoras vadinamas ***meteoritù*** (žr. 11.5.7 pav.). Nedideli meteoritai Žemės atmosferoje dažniausiai visiškai išgaruoja, taigi iki Žemės atkeliauja tik didesnių meteoritų likučiai. Meteoritai skirstomi į tris pagrindines grupes: geležiniùs (sideritùs), geležiniùs akmeniniùs (siderolitùs) ir akmeniniùs (aerolitùs). Visi jie turi tam tikrų savitų požymių, pagal kuriuos net labai seniai nukritusius meteoritus galima atskirti nuo žemiškų uolienų. Apie 95 % meteoritų yra akmeniniai. Patys didžiausi meteoritai guli ten, kur nukrito. 75 t masės Hòbos meteoritas (dabar jo masė 54 t) 1920 m. rastas Namìbijos šiaurėje netoli Grutfonteĩno miesto. Bakubirìtos akmuo Mèksikoje sveria 27 t. Vienas iš didžiausių meteoritų buvo ir Sichotè Alìnio meteoritas, 1947 m. Primòrės krašte 4–5 km aukštyje suskilęs į daugybę skeveldrų. Surinkta 27 t jo gabalų. Lietuvojè taip pat yra nukritusių meteoritų. Jų duomenys (nukritimo data, vietovė ir masė) pateikti lentelėje.

Data	Vietovė	Masė
1877 m. birželio 17 d.	Pãnevėžio r. Juodžiū̃ k.	51,5 kg
1908 m. gegužės 25 d.	Akmẽnės apylinkės	1 kg
1929 m. vasario 9 d.	Anykščiū̃ r.	3,86 kg
1933 m. vasario 1 d.	Ukmergẽs r. Žemaĩtkiemio k.	42 kg



11.5.9 pav.

Į Žemę meteoritai atkeliauja ir iš kitų planetų, pavyzdžiui, Marso (11.5.9 pav.). Mokslininkai Antarktìdoje, Omanè ir Sachãros dykumoje rado penkis Marso meteoritus. Vieno iš jų masė 13,7 kg; tai antras pagal dydį iš visų žinomų iš Marso atklydusių meteoritų. Dabar šių retų raudonosios planetos bandinių jau rasta 24. Meteoritai yra vieninteliai Marso medžiagos gabalai, kuriuos galima pačiupinėti. Mokslininkai deda daug vilčių į jų tyrimus, tikėdamiesi iš meteoritų cheminės sudėties nustatyti planetos klimato istoriją. Apie 2011 m. NASA planuoja į Marsą pirmąkart pasiųsti erdvėlaivį, paimsiantį planetos grunto bandinių.

Atsitrenkdami į Žemę, dideli meteoritai išmuša joje kraterius, vadinamus ***astroblèmomis*** (11.5.10 pav.), arba „žvaigždžių žaizdomis“ (gr. *astron* – žvaigždė,



11.5.10 pav.

blēma – žaizda). Primename, kad astroblemų yra ir Lietuvojè: 8 km skersmens – Vẽpriuose (Ukmer-gẽs r.), 5 km skersmens – Mizarų̃ kaime prie Drùs-kininkų. Spėjama, kad ir netoli Aukštādvario esanti 200 m skersmens ir 45 m gylio Vélnio duobė̃ taip pat yra meteorito padarinys.

Klausimai ir užduotys

1. Išvardykite mažuosius Saulės sistemos kūnus.

2. Ar asteroidai yra spinduoliai? Kodėl juos matome? Atsakymą pagrįskite.

3. Kodėl kometos pavidalas priklauso nuo jos padėties Saulės atžvilgiu?

4*. Kodėl kometos uodega nukreipta į priešingą Saulei pusę?

5. Paaiškinkite, kaip atsiranda krintančios žvaigždės.

6. Kas yra meteoritai? Kaip jie skirstomi pagal savo cheminę sudėtį?

7. Ką vadiname astroblemomis? Kokias žinote astroblemas Lietuvojè; pasaulyje?

8. Ar gali prie Saulės periodiškai grįžtanti kometa nuolat būti tokio paties pavidalo? Atsakymą pagrįskite.

9. Kokiais stebėjimais galima įrodyti, kad kometos nėra atmosferos dariniai, kaip buvo manoma senovėje?

10. Kodėl matome meteorus?

11.6. Saulė – artimiausia Žemei žvaigždė

Pagrindinės sąvokos

Žvaigždė̃, fotosferà, chromosferà, vainìkas, protuberántas.

Žvaigždžių sandara

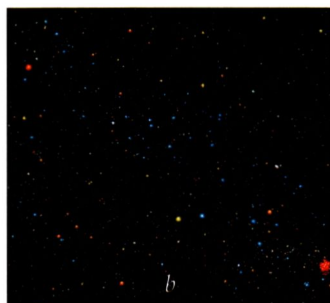
Giedrą naktį danguje matome begalę spindinčių taškelių – žvaigždžių. Žvaigždėto dangaus vaizdas visais laikais stebino ir žavėjo žmones. Vis dėlto kas yra žvaigždės? Apie jas sužinosite gvildendami šią bei tolesnes temas. Kartu įsitikinsite, kad astronomija ir fizika – labai susiję mokslai. Teks prisiminti per fizikos pamokas nagrinėtas termobranduolines reakcijas, plazmą, šilumos perdavimo būdus, spektrus.

Didelės masės įkaitusios plazmos rutulys, sudarytas daugiausia iš vandenilio ir helio su nedidele sunkesniųjų cheminių elementų priemaiša, vadinamas ***žvaigždè***. Sunkesniųjų elementų joje yra nedaug, apytiksliai 1–2 % žvaigždės masės. Žvaigždės skleidžia elektromagnetinę spinduliuotę, elektringąsias daleles (neutrinus).

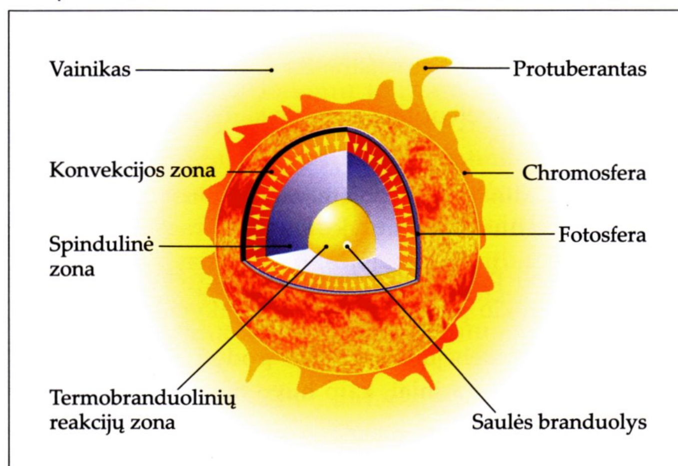
Saulė yra artimiausia mums žvaigždė. Tačiau Saulės vaizdas iš Žemės skiriasi nuo kitų žvaigždžių. Ji yra taip arti Žemės, kad atrodo kaip diskas, kuris skleidžia šviesą (11.6.1 pav., *a*). Kitos žvaigždės matomos kaip maži taškeliai (11.6.1 pav., *b*).

11.6.1 pav.





11.6.2 pav.



Aptardami žvaigždžių sandarą, prisiminkime, kokia yra Saulės sandara. Pagal temperatūros kitimą ir nuo jos priklausančių procesų pobūdį Saulė sąlygiškai skaidoma į keturias sritis (11.6.2 pav.):

- vidinę centrinę sritį, kurią sudaro branduolys, arba šerdis (nuo Saulės centro iki $\frac{1}{3}R$);
- spindulinę zoną, kurioje energija plinta iš gilesnio sluoksnio į aukštesnį (nuo $\frac{1}{3}R$ iki $\frac{2}{3}R$);
- konvekcijos zoną (nuo viršutinio spindulinės zonos krašto iki regimojo Saulės paviršiaus);
- atmosferą (nutįstančią nuo konvekcijos zonos už regimojo Saulės disko ribų).

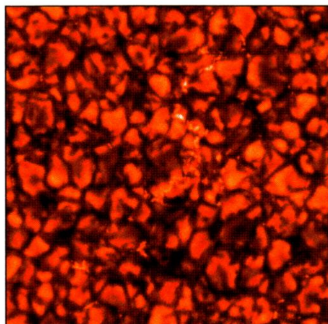
Žvaigždžių energijos šaltiniai

Žvaigždė įkaista dėl jos branduolyje vykstančių vandenilio, helio, anglies ir kitų elementų termobranduolinių reakcijų. Skaičiavimai rodo, kad Saulės centre dujų tankis siekia $1{,}5 \cdot 10^5$ kg/m^3 (13 kartų didesnis negu švino), slėgis – $2 \cdot 10^{18}$ Pa, o temperatūra – 15 mln. K. Kai temperatūra tokia aukšta, vandenilio atomų branduoliai įgyja didžiulį greitį (šimtus kilometrų per sekundę) ir, įveikę elektrostatines stūmos jėgas, gali susidurti vieni su kitais. Prasideda termobranduolinės reakcijos – vandenilis virsta heliu ir išsiskiria nepaprastai daug energijos (šilumos). Ši energija perduodama iš žvaigždės centrinės dalies į paviršių visais būdais: spinduliãvimu, konvèkcija, šilumõs laidumù. Didesnę žvaigždės egzistavimo trukmės dalį tarp jos dujų nusistovi termodinaminė pusiausvyra: paviršius išspinduliuoja apytiksliai tiek pat energijos, kiek jos išsiskiria gelmėse.

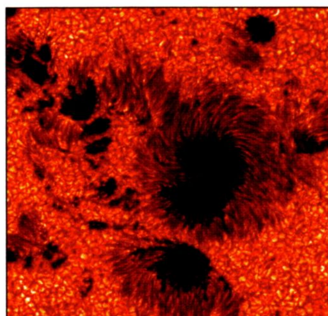
Termobranduolinės reakcijos yra Saulės energijos šaltinis dabartiniame jos evoliucijos etape. Dėl jų helio pamažu daugėja, o vandenilio mažėja. Ilgainiui branduolinis kuras žvaigždės gelmėse išsenka ir termobranduolinės reakcijos persikelia į toliau nuo centro esančius sluoksnius. Vėliau centre prasideda naujos sunkesniųjų elementų (helio, anglies ir kt.) termobranduolinės reakcijos. Dėl to žvaigždė ima pūstis[1] arba trauktis, keičiasi jos gelmių ir paviršiaus temperatūra. Taip milijonus arba milijardus metų tęsiasi žvaigždės gyvenimas, vadinamas jos evoliucija.

[1] Plačiau apie šiuos procesus sužinosite 11.8 temoje.

Žvaigždžių atmosfera

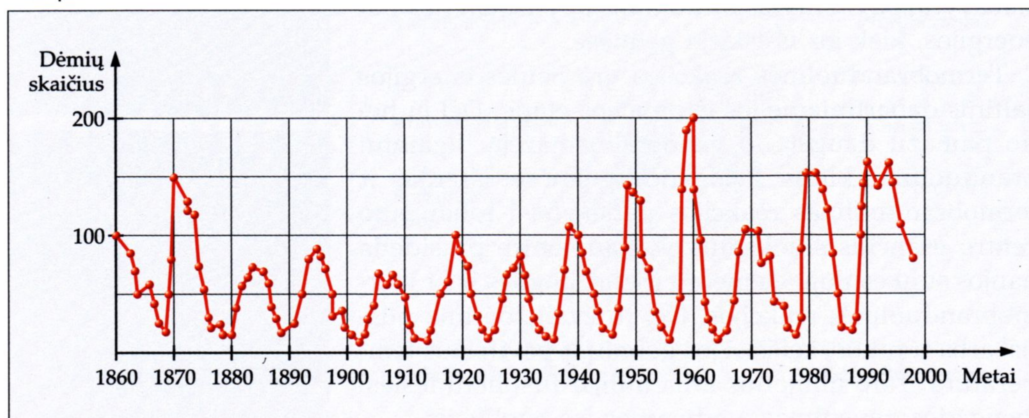

11.6.3 pav.

Žvaigždės medžiagos tankis nuo centro išorės link mažėja. Pasiekę retus jos sluoksnius, spinduliai toliau sklinda laisvai. Čia prasideda žvaigždės atmosfera. Giliausias jos sluoksnis, kuris spinduliuoja į erdvę daugiausia energijos, vadinamas ***fotosferà*** (gr. *phōs* (kilm. *phōtos*) – šviesa, *sphaira* – rutulys). Panašių į Saulę žvaigždžių fotosferos sluoksnis siekia apie 200–300 km. Kylant į viršų, Saulės fotosferos temperatūra nukrinta maždaug nuo 8000 K iki 4000 K. Saulės fotosferos nuotraukose labai aiškiai matoma jos sandara – ryškūs grūdeliai, vadinami grãnulėmis (11.6.3 pav.). Grūdeliai yra maždaug 1000 km skersmens ir perskirti tamsių tarpelių. Granulės yra karštų dujų burbulai, kylantys iš gelmių aukštyn. Granulių temperatūra 200 K aukštesnė negu jas supančių tamsesnių sričių.

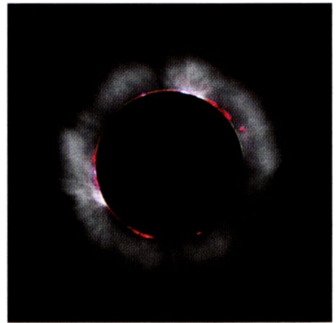

11.6.4 pav.

Kartais atskirose fotosferos srityse tamsūs tarpeliai tarp granulių pradeda didėti, atsiranda tamsių dėmių (11.6.4 pav.). Tamsios jos atrodo tik dėl kontrasto su karštesne (šviesesne) fotosferos dalimi. Dėmių temperatūra siekia apie 3700 K. Dėmės yra nestabilūs dariniai. Jų skaičius ir padėtis kinta. Nustatyta, kad Saulės dėmių skaičius keičiasi periodiškai, kas 11 metų. Šis dėsningumų ciklas vadinamas Saulės aktyvumo periodu (11.6.5 pav.). Periodo pradžioje dėmių beveik nebūna, paskui jų ima daugėti, kol po keleto metų pasiekiamas Saulės aktyvumo maksimumas. Tada aktyvumas pradeda mažėti. Pagrindinė dėmių savybė – labai stiprūs jų magnetiniai laukai ir Saulės aktyvumo kaita.

11.6.5 pav.

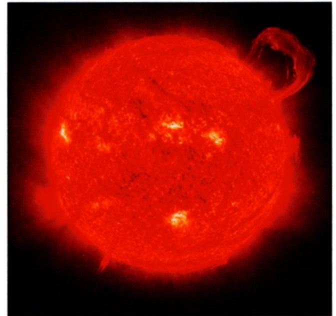


Virš Saulės fotosferos prasideda ***chromosferà*** (gr. *chroma* – spalva, *sphaira* – rutulys) – atmosferos sritis, kurioje išorės link temperatūra kyla ir vyksta nuosekli vandenilio, helio bei kitų elementų jonizacija. Visiškojo Saulės užtemimo metu, kai Mėnulio diskas uždengia fotosferą, chromosfera regima kaip žvilganti rožinė juosta (11.6.6 pav.). Aktyviosiose chromosferos srityse pastebimi žybsniai – staiga padidėja chromosferos skaistis, išmetami galingi dujų gniužulai, karštos plazmos srautas ima judėti greičiau.



11.6.6 pav. © Luc Viatour

Virš chromosferos Saulės dujų temperatūra pakyla iki 10^6–$2 \cdot 10^6$ K. Toliau ji atstumu, lygiu kartais net keletui Saulės spindulių, beveik nekinta. Ši Saulės atmosferos sritis vadinama ***Sáulės vainikù***. Jo dujos nuo Saulės srūva karštu plazmos srautu, vadinamu Saulės vėju. Vainike galima įžvelgti aktyvių darinių – ***protuberántų*** (11.6.7 pav.). Tai įvairios formos, tankesni už vainiko medžiagą dujų debesys. Jų formą ir judėjimą lemia fotosferos magnetiniai laukai.



11.6.7 pav.

Saulės įtaka Žemei

Iš Saulės sklindanti regimoji šviesa ir infraraudonoji spinduliuotė šildo Žemę. Šiuo metu, mažėjant naftos, gamtinių dujų ir anglių ištekliams, ieškoma būdų, kaip efektyviau panaudoti Saulės energiją elektros energijos gamybai, pastatų šildymui.

Padidėjęs Saulės aktyvumas sukelia daugelį geofizinių reiškinių. Chromosferos žybsnių pagreitintų elektringųjų dalelių srautai veikia Žemės magnetinį lauką ir sukelia magnetines audras. Prasiskverbusios į žemesniuosius atmosferos sluoksnius, elektringosios dalelės sužadina poliarines pašvaistes. Trumpabangė Saulės spinduliuotė sustiprina viršutinių Žemės atmosferos sluoksnių jonizaciją, o tai, kaip žinome, turi įtaką radijo bangų sklidimui (žr. „Fiziką 12“, išplėstinio kurso pirmąją knygą, p. 230) – jonosferos sluoksnio pokyčiai gali sutrikdyti radijo ryšį.

Aktyvūs procesai Saulėje veikia Žemės atmosferą, jos magnetinį lauką, o šio kitimas, atmosferos reiškiniai – organinį pasaulį: žmones, augalus, gyvūnus. Veikiant Saulės spinduliuotei, žaliuose medžių, žolės lapuose, spygliuose vyksta fotosintezės reakcijos: lapai sugeria iš oro anglies dioksidą ir suskaido jo molekules į anglį ir deguonį.

Klausimai ir užduotys

1. Apibūdinkite vidinę Saulės sandarą.

2. Apibūdinkite Saulės atmosferą. Kokie reiškiniai vyksta joje?

3. Kas yra žvaigždžių energijos šaltiniai?

4. Ką vadiname Saulės fotosferos granulėmis? Kodėl jos atsiranda?

5. Kas yra Saulės dėmės? Kas joms būdinga?

6. Kokią įtaką Saulė turi Žemei? Pateikite pavyzdžių.

7. Per 1 min kiekvieną kvadratinį metrą Žemės paviršiaus pasiekia $2{,}1 \cdot 10^4$ J Saulės energijos. Remdamiesi šiais duomenimis ir tardami, kad atmosfera Saulės energijos nesugeria, apskaičiuokite:

a) per kiek laiko statmenai krintantys saulės spinduliai ištirpintų 1 cm storio ledo sluoksnį, dengiantį Žemę; (per 40 min)

b) kokios masės kūnas, krisdamas iš 100 m aukščio, prie Žemės paviršiaus įgytų tiek kinetinės energijos, kiek jos kas valandą iš Saulės gauna 10 m^2 Žemės paviršiaus. (≈ 12,6 t)

11.7. Žvaigždžių klasifikacija

Pagrindinės sąvokos

Paralãksas,
horizòntinis paralãksas,
mẽtinis paralãksas,
žvaigždẽs spindesỹs,
žvaigždẽs šviẽsis,
regimàsis ryškis,
absoliutùsis ryškis,
HR diagramà.

Žvaigždžių klasifikavimas pagal jų spektrus

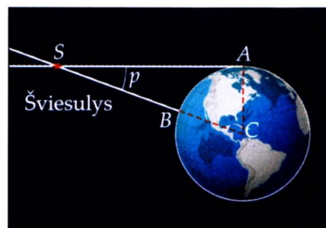
Vertingų žinių apie šviesulius gaunama taikant spektrinę analizę. Taip iš šviesulių spektrų, kurie dažniausiai būna sugerties spektrai, nustatoma šviesulių kokybinė ir kiekybinė cheminė sudėtis, temperatūra, išsiaiškinama, ar jie turi magnetinį lauką, kokiu greičiu juda. Pagal cheminių elementų linijų buvimą ir jų tamsį žvaigždės skirstomos į spektrines klases O, B, A, F, G, K ir M (temperatūros žemėjimo kryptimi). O ir B klasės žvaigždžių spinduliavimo stiprio maksimumas yra ultravioletiniame spektro ruože, A – vio-

letiniame, F – mėlynajame, G – žaliajame ir geltonajame, K ir M – raudonajame ir infraraudonajame ruože. Raudonųjų, t. y. šaltųjų, žvaigždžių temperatūra siekia 3000 K, geltonųjų (prie jų priskiriama ir Saulė) – apie 6000 K, baltųjų A klasės žvaigždžių – apie 10 000 K, o karščiausių žydrųjų B klasės žvaigždžių – net 30 000–50 000 K.

Aptarėme žvaigždžių klasifikavimą pagal jų spektrus. Tačiau žvaigždės dar skirstomos ir kitu būdu. Norint jį suprasti, reikia susipažinti su keletu naujų astronomijos sąvokų.

Atstumas iki žvaigždžių

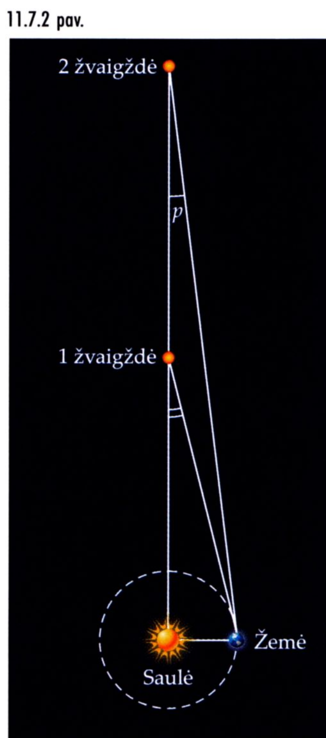
Kuo ir kaip išreikšti atstumą iki žvaigždžių? Žemės spindulio ilgis per mažas, kad galėtų būti ilgio etalonu. Klasikinis atstumo nustatymo būdas yra geometrinis, pagrįstas paralaksù (gr. *parallaxis* – nuokrypa). ***Paralaksù*** vadinamas stebėjimo krypties pasikeitimas dėl stebėtojo vietos kitimo. Ištieskite ranką į priekį ir pažiūrėkite į savo pirštą iš pradžių viena akimi, paskui – kita. Matysite, kad pirštas pakeitė padėtį tolimų daiktų atžvilgiu. Kuo toliau laikysite pirštą, tuo mažesnis bus paralaksas. Antra vertus, jis bus tuo didesnis, kuo toliau vienas nuo kito bus taškai, iš kurių stebima, t. y. kuo didesnė bus vadinamoji bazė. Šiuo atveju bazė yra atstumas tarp akių. Matuojant atstumą iki Saulės sistemos kūnų, baze laikomas Žemės rutulio spindulys. Kampas p, kuriuo iš šviesulio S būtų matomas Žemės spindulys AC, statmenas regėjimo spinduliui, vadinamas ***horizòntiniu paralaksù*** (11.7.1 pav.)



11.7.1 pav.

Žemė skrieja aplink Saulę, todėl regimosios žvaigždžių padėtys dangaus skliaute kinta. Per pusmetį Žemė pereina į kitą savo orbitos skersmens galą. Kryptys į žvaigždę iš abiejų tos orbitos skersmens galų skiriasi paralakso dydžiu. ***Žvaigždė̃s mẽtiniu paralaksù vadinamas kampas p, kuriuo iš žvaigždės būtų matomas Žemės orbitos didysis pusašis, statmenas regėjimo spinduliui*** (11.7.2 pav.). Kuo toliau yra žvaigždė, tuo mažesnis jos paralaksas. Išmatavus metinį paralaksą, galima tiksliai nustatyti atstumą iki tokių žvaigždžių, kurias nuo mūsų skiria ne daugiau kaip 300 šviesmečių. (Prisiminkime, kad šviesmetis (šm) yra atstumas, kurį šviesa įveikia per metus.

11.7.2 pav.



1 šm = 9,46 · 10^{12} km.) Dėl didelio žvaigždžių nuotolio nuo Saulės jų metiniai paralaksai mažesni negu 1″. Pavyzdžiui, Kentauro Proksimos metinis paralaksas yra 0,762″, Sirijaus – 0,376″, Arktūro – 0,090″, Vegos – 0,123″.

Atstumą iki žvaigždžių patogu reikšti vienetais, kurie vadinami parsekais (žymima pc). ***Parsèkas yra atstumas, iš kurio Žemės orbitos didysis pusašis, statmenas regėjimo spinduliui, matomas 1″ kampu:***

$$1 \text{ pc} = 3{,}26 \text{ šm} = 3{,}086 \cdot 10^{13} \text{ km}. \qquad (11.1)$$

Atstumas parsekais lygus metinio paralakso, išreikšto sekundėmis, atvirkštiniam dydžiui.

Žvaigždžių charakteristikos

Žvaigždės skiriasi vienos nuo kitų ne tik spalva, bet ir spindesiu. Žvaigždžių spindesys rodo, koks jų skleidžiamos spinduliuotės srautas pasiekia vienetinį Žemės paviršiaus plotą, statmeną srauto krypčiai. Astronomijoje jis matuojamas specialiais santykiniais vienetais, kurie vadinami ***regimaĩsiais rỹškiais***[1]. Kuo mažesnis žvaigždės ryškis, tuo didesnis jos spindesys. Antai 1-ojo ryškio žvaigždės spindesys yra 100 kartų didesnis negu 6-ojo ryšio.

Regimasis ryškis neatspindi tikrojo spinduliuojamo energijos srauto. Jį apibūdina absoliutusis ryškis. ***Žvaigždẽs absoliučiúoju ryškiù M vadiname tą regimąjį ryškį, kurį turėtų žvaigždė, jei būtų nutolusi nuo mūsų standartiniu atstumu D_0 = 10 pc.*** Labai šviesių žvaigždžių absoliutieji ryškiai yra neigiami ir siekia iki M = –8, o kartais ir daugiau. Tokios žvaigždės vadinamos milžinėmis ir supermilžinėmis.

Regimasis žvaigždės spindesys priklauso nuo atstumo iki jos ir tikrosios jos spinduliavimo galios, arba kitaip – žvaigždės šviesio.

Žvaigždẽs šviesiù L vadiname žvaigždės, žvaigždžių spiečiaus arba galaktikos spinduliavimo galią. Žvaigždės šviesis matuojamas vatais arba Saulės šviesio vienetais. Pavyzdžiui, Aukso Žuvies žvaigždyno žvaigždė S yra 500 000 kartų šviesesnė už mūsų Saulę. Vadinasi, jos šviesis $L = 500\,000 L_{\odot}$[2]. Mažiausias yra šaltųjų raudonųjų nykštukių šviesis: $L = 0{,}000\,013 L_{\odot}$. Jeigu dviejų žvaigždžių šviesiai yra vienodi, tai tolimesnė žvaigždė spindi blankiau.

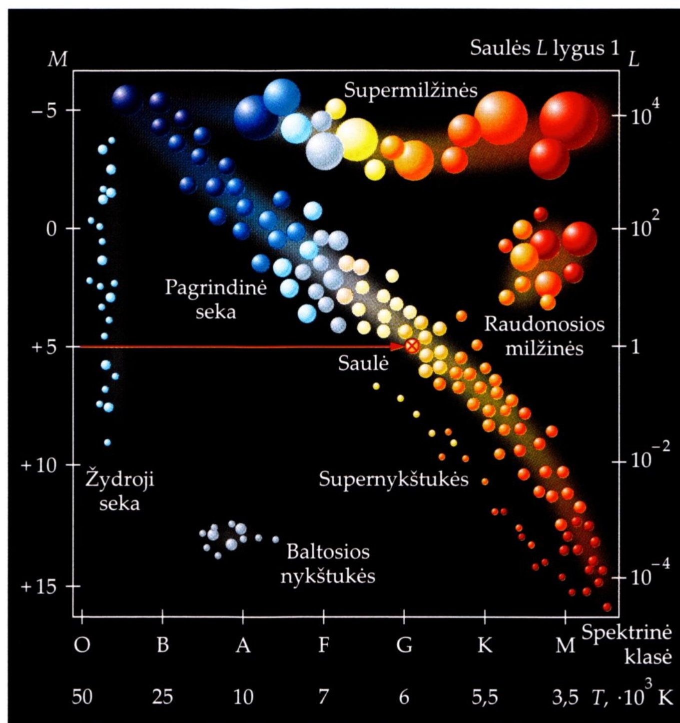
[1] Spinduliuotės srauto matavimo vienetas yra vatas kvadratiniam metrui (W/m^2).

[2] $L_{\odot}$ – Saulės šviesis.

Hercšprungo ir Raselo diagrama

Plika akimi galima matyti 6000 žvaigždžių. Kataloguose jų yra daugiau kaip 2 milijardai. Vardus turi 275 didžiausio spindesio žvaigždės. Tyrinėdama žvaigždes, astronomija išaiškino didelę jų įvairovę. Žvaigždžių skiriasi masė, temperatūra, šviesis, tankis. Visoje šioje žvaigždžių ir jų charakteristikų įvairovėje buvo atrasti dėsningumai, pagal kuriuos sudaryta žvaigždžių diagrama. 1911–1913 m. danas Einaras Hercšprungas (*Ejnar Hertzsprung*, 1873–1967) ir amerikietis Henris Raselas (*Henry Russell*, 1877–1957) nustatė, kad žvaigždžių fizinės charakteristikos yra susijusios. Įdomus žvaigždžių šviesio sugretinimas su jų temperatūra ir spalva. Ši spalvos ir šviesio priklausomybė vaizduojama diagrama, kuri pagal pirmąsias autorių pavardžių raides vadinama ***HR diagramà*** (11.7.3 pav.).

Žvaigždės HR diagramoje pagal savo fizines charakteristikas išsidėsto ne bet kaip, o užima tam tikras juostas ir sritis, t. y. sudaro sekas. Dauguma žvaigždžių sudaro seką, einančią iš kairiojo viršutinio kampo į dešinįjį apatinį. Šia kryptimi žvaigždžių šviesis



11.7.3 pav.

ir temperatūra mažėja. Tai pagrindinė žvaigždžių seka. Joje yra ir artimiausia mums žvaigždė – Saulė. Pagrindinėje sekoje ji pažymėta kryželiu. Viršuje į horizontalią diagramos juostą patenka palyginti nedaug šviesių, masyvių ir ne itin karštų žvaigždžių, sudarančių supermilžinių seką, apačioje randame aukštos temperatūros silpnai šviečiančias žvaigždes, vadinamas baltosiomis nykštukėmis. HR diagrama neparodo žvaigždžių gausumo, kuris skirtingose Visatos vietose nėra vienodas.

HR diagramoje nurodytas žvaigždes aptarsime kitoje temoje.

Klausimai ir užduotys

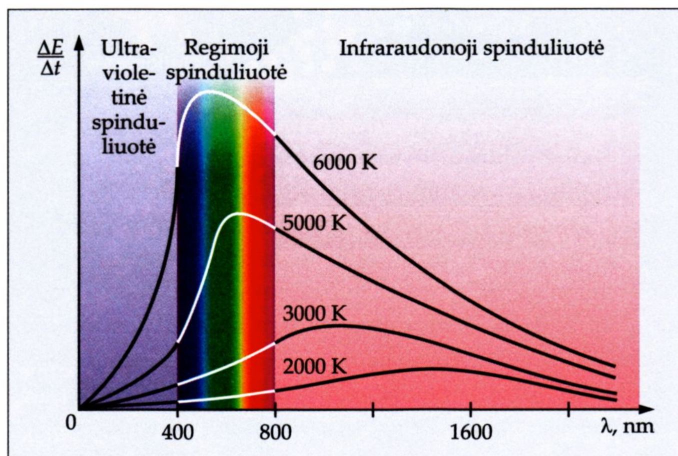
1. Kokių duomenų apie žvaigždes galima gauti taikant spektrinę analizę?

2. Kokius spektrus vadiname sugerties spektrais? Kodėl žvaigždžių spektrai dažniausiai yra sugerties?

3. 11.7.4 paveiksle pavaizduotos kreivės, rodančios, kaip įvairios temperatūros žvaigždžių spinduliavimo galia priklauso nuo bangos ilgio. Kokių spektrinių klasių žvaigždžių spinduliavimo galios kreivės pavaizduotos paveiksle? Atsakymą pagrįskite.

4. Kaip nustatomas atstumas iki žvaigždžių? Koks yra jo matavimo vienetas? Kaip jis susijęs su jau žinomais ilgio matavimo vienetais: šviesmečiu (šm), astronominiu vienetu (av)?

11.7.4 pav.



5*. Ką vadiname:
a) žvaigždės šviesiu; b) absoliučiuoju ryškiu?

6*. Kaip sudaryta HR diagrama? HR diagramoje raskite Saulę. Pagal diagramą nustatykite jos:
a) šviesį; c) spektrinę klasę;
b) absoliutųjį ryškį; d) temperatūrą.

11.8. Žvaigždžių evoliucija

Žvaigždžių raidos etapai

Visatoje viskas keičiasi. Kinta ir žvaigždės. Jų gyvavimo laikotarpį galima suskirstyti į keturis etapus.

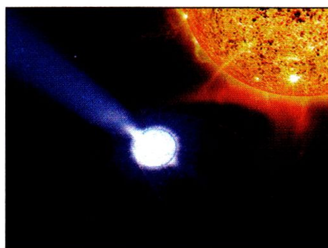
- I etapas – *žvaigždėdara*. Žvaigždės pradeda formuotis tirštėjant šaltai tarpžvaigždinei medžiagai. Pirmiausia susidaro tankesni gniužulai, vadinamosios ***prožvaigždės***. Joms traukiantis, temperatūra kyla, kol gelmėse pasiekia 10 mln. K. Visos traukimosi stadijos prožvaigždės sukasi apie savo ašį. Manoma, kad dėl sukimosi nuo prožvaigždės gali atsiskirti jos medžiagos žiedas ir susidaryti būsimoji planetų sistemos užuomazga. Vienas artimas žvaigždėdaros pavyzdys yra Oriono ūkas.
- II etapas – *pagrindinė seka*. Temperatūrai pakilus iki 10 mln. K, žvaigždės centre prasideda branduolinės vandenilio virsmo heliu reakcijos. Šis raidos etapas vadinamas žvaigždės pagrindinės sekos periodu. Žvaigždė tuo metu būna stabili. Šis etapas apima 90 % žvaigždės gyvavimo laiko. HR diagramoje tokios žvaigždės išsidėsto pagrindinėje sekoje.
- III etapas – *pakeliui į raudonąsias milžines*. Kai vandenilio atsargos žvaigždės centre išsenka, ji pradeda kisti. Išorinis sluoksnis išsiplečia ir atvėsta. Žvaigždei pučiantis, jos branduolys ima trauktis ir kartu smarkiai kaisti. Kai temperatūra žvaigždės gelmėse pasiekia 350 mln. K, prasideda helio virsmas anglimi – susiformuoja ***raudonóji milžinė̃*** (11.8.1 pav.). Po 3 milijardų metų Saulė taip pat taps raudonąja milžine.

Pagrindinės sąvokos

Prožvaigždė̃,
raudonóji milžinė̃,
baltóji nykštùkė,
pulsãras,
juodóji skylė̃.

11.8.1 pav.





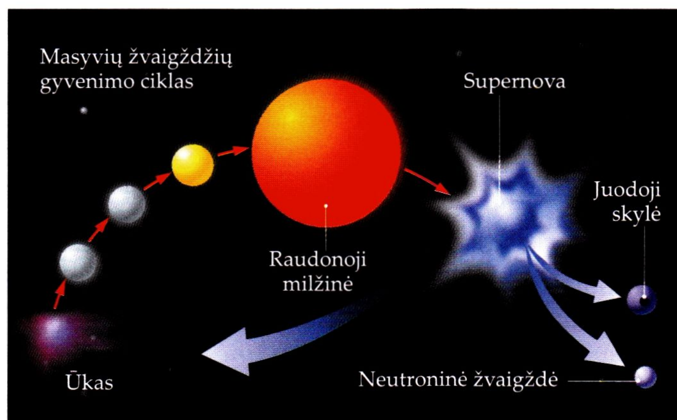
11.8.2 pav.

• IV etapas – *žvaigždžių mirtis*. Skirtingos masės žvaigždės miršta nevienodai. Pirma aptarkime mažų žvaigždžių (kurių masė mažesnė už aštuonias Saulės mases) paskutinį gyvavimo etapą. Šiuo laikotarpiu branduolinių reakcijų zona artėja prie paviršiaus. Kai ji atsiduria netoli to paviršiaus, nuo žvaigždės planetiškojo ūko pavidalu atsiskiria viršutiniai sluoksniai. Žvaigždės branduolys neišsisklaido. Šis žvaigždės likutis vadinamas ***baltája nykštukè*** (11.8.2 pav.). Ji yra labai karšta ir priverčia švytėti aplink esančią savo pačios numestą medžiagą – ūką.

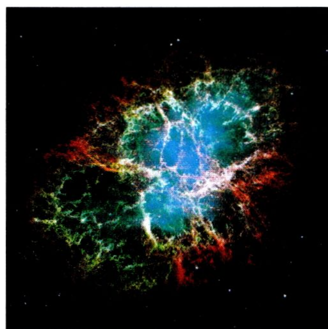
Supernovos

Žvaigždė, kurios masė didesnė negu aštuonios Saulės masės, evoliucionuoja kitaip (11.8.3 pav.). Jos branduolyje susidaro geležis, kuri žvaigždėje nebevirsta niekuo kitu. Geležinis branduolys nebegamina energijos. Dėl to jis negali atlaikyti virš jo slūgsančių sluoksnių slėgio. Slegiama branduolio medžiaga sutankėja tiek, kad elektronai įspaudžiami į branduolius. Čia jie pradeda jungtis su protonais – susidaro neutronai. Taip per keletą sekundžių žvaigždės branduolys virsta neutroniniu telkiniu. Išsiskyrusi energija ir išspinduliuotų neutrinų lavina nubloškia žvaigždės apvalkalą ūko pavidalu. Šio sprogimo metu žvaigždės spindesys labai padidėja. Ji spinduliuoja kaip visa galaktika. Tokios žvaigždės vadinamos ***supernòvomis***. 1054 m. viena supernova sužibo Taũro žvaigždyne. Jai tvykstelėjus, atsirado šviečiantis Krãbo ũkas (11.8.4 pav.). Jis yra vienas galingiausių ra-

11.8.3 pav.



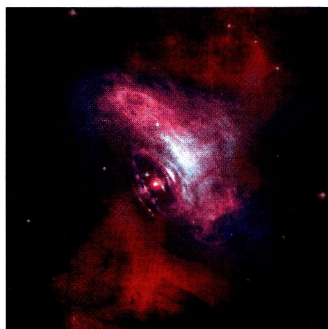
dijo ir rentgeno spinduliuotės šaltinių. Krabo ūkas plečiasi 1000 km/s greičiu. Supernovų sprogimas – retas reiškinys. Per pastaruosius 2000 metų mūsų Galaktikoje sprogo tik 9 supernovos, 8 iš jų sprogimą buvo galima matyti plika akimi.


11.8.4 pav.

Neutroninės žvaigždžės (pulsarai)

Po supernovos sprogimo lieka maždaug trijų Saulės masių buvusios žvaigždės liekana – neutroninė žvaigždė, kitaip dar vadinama ***pulsarù*** (11.8.5 pav.). Sukdamasi ji spinduliuoja šviesos ir radijo bangų pluoštus. Pulsarą nesunku įsivaizduoti prisiminus švyturį. Siauras pulsaro radijo bangų pluoštas plinta erdvėje panašiai kaip besisukančio švyturio šviesa. Ją galima sugauti tik tada, kai ji nukreipta į Žemę.

Šiuo metu yra žinoma apie 1000 pulsarų. Astronominiai stebėjimai rodo, kad, senkant energijai, pulsarai sukasi vis lėčiau. Aptikta pulsarų, per sekundę apsisukančių apie savo ašį net kelis šimtus kartų.


11.8.5 pav.

Juodosios skylės

Jei po supernovos sprogimo lieka didesnė negu trijų Saulės masių žvaigždė, ji traukiasi toliau ir susidaro juodoji skylė (11.8.3 pav.). Didelės masės žvaigždžių tankis pasiekia ribą, kai nelieka jėgų, galinčių atsverti (kompensuoti) gravitacijos jėgas. Šios padidėja tiek, kad ima viską traukti į žvaigždės vidų. Susiformuoja ***juodóji skylė̃*** – erdvės sritis, iš kurios negali ištrūkti jokios dalelės ar elektromagnetinės bangos. Juodoji skylė nematoma. Astronomai ją gali aptikti pagal poveikį gretimoms žvaigždėms. Nustatyta, kad dujos, lekiančios į juodąją skylę, įkaista iki 100 mln. °C. Juodosios skylės – rentgeno spinduliuotės šaltiniai. Manoma, kad šią spinduliuotę skleidžia medžiaga, milžinišku greičiu krintanti į juodąją skylę.

Klausimai ir užduotys

1. Apibūdinkite žvaigždžių evoliucijos etapus.

2. Kas yra pulsarai? Kaip jie atsiranda?

3. Kas yra juodosios skylės? Kaip jos susidaro?

4. Raudonosios supermilžinės skersmuo 300 kartų didesnis nei Saulės, o masė didesnė 30 kartų. Apskaičiuokite raudonosios supermilžinės tankį.

11.9. Kintamosios žvaigždžės

Pagrindinės sąvokos

Kiñtamosios žvaĩgždės,
užtémdomosios žvaĩgždės,
fìzinės kiñtamosios žvaĩgždės,
cefeìdės,
nòvos.

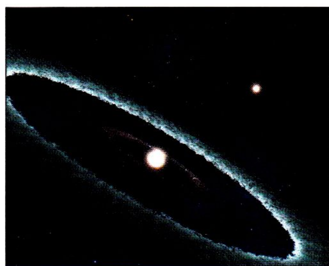
Kintamųjų žvaigždžių samprata

Pastebėta, kad kai kurių žvaigždžių šviesis laikui bėgant kinta. Tokios žvaigždės vadinamos ***kintamõsiomis žvaigždėmìs***. Šio reiškinio priežastys gali būti įvairios. Žvaigždžių šviesis gali kisti dėl jų judėjimo, dėl fizikinių procesų, vykstančių žvaigždės viduje. Atsižvelgiant į tai, kintamosios žvaigždės skirstomos į užtémdomąsias ir fìzines kintamą́sias.

Dvinarės žvaigždžės

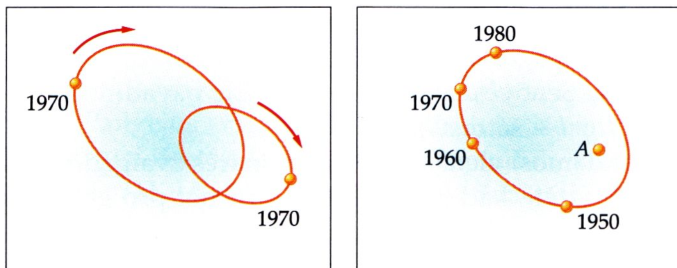
Užtémdomųjų žvaigždžių̃ grupei priskiriamos dvinãrės ir daugianãrės žvaĩgždės. Aptarsime dvinares žvaigždes. Jos gali būti òptinės ir fìzinės.

Be pavienių žvaigždžių, Visatoje yra daug žvaigždžių, kurios sudaro poras. Ilgai manyta, kad tokios poros yra atsitiktinės projekcijos dangaus skliaute, tik regėjimo iliuzija. Šios žvaigždžių poros vadinamos optinėmis dvinarėmis žvaigždėmis (11.9.1 pav.). Fizinių žvaigždžių poras 1793 m. pirmą kartą pastebėjo Viljamas Heršelis. Tokią žvaigždžių porą sudaro žvaigždžių dvejetai, skriejantys apie bendrą masės centrą. Silpnesnioji dvejeto žvaigždė – palydovė[1] – skrieja aplink šviesesniąją (11.9.2 pav., *a*). Pagrindinė žvaigždė (*A*) paprastai būna elipsės, kurią brėžia žvaigždė palydovė, židinyje (11.9.2 pav., *b*). Artimiausia mums dvinarė žvaigždė yra Kentauro α. Ją sudarančių žvaigždžių skriejimo periodas trunka 70 metų. Abi šio dvejeto žvaigždės temperatūra ir mase panašios į Saulę.



11.9.1 pav.

[1] Sirijaus ir jo palydovės sistema.



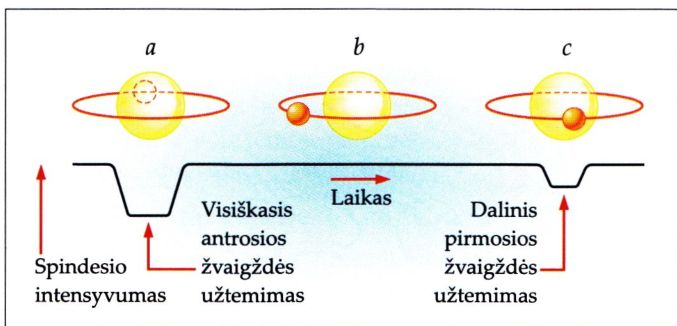
11.9.2 pav.

Pagal atradimo būdą dvinarės žvaigždės skirstomos į vizualines, spektrines, užtemdomąsias ir astrometrines. Vizualinių abu nariai matomi atskirai. Pavyzdžiui, tokią dvinarę sistemą Didžiũjų Grĩžulo Rãtų žvaigždyne sudaro Micãras ir Alkòras. Juos galima įžiūrėti plika akimi: vienas yra 2,4, kitas – 3,9 ryškio (11.9.3 pav.). Kai kurios dvinarės žvaigždės susideda iš tos pačios spektrinės klasės žvaigždžių, tačiau yra tokių, kurių narių spalva skiriasi, pavyzdžiui, Gùlbės β (S Cyg). Šio žvaigždžių dvejeto pagrindinis narys yra oranžinė, o palydovas – žalsvai žydra žvaigždė. Nesunku įsivaizduoti, kokios nuostabios spalvos turėtų būti planetoje, skriejančioje aplink vieną iš dvinarių žvaigždžių. Tokios planetos danguje turėtų šviesti oranžinė ir žydra saulė.

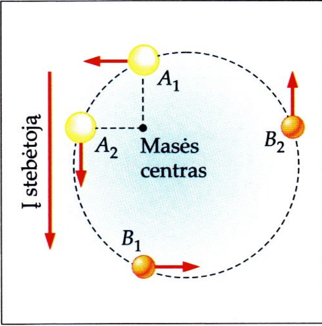


11.9.3 pav.

Kai kurios dvinarės žvaigždės pastebimos pagal jų spindesio kitimą. Jos vadinamos užtemdomosiomis dvinarėmis žvaigždėmis. Šių žvaigždžių spindesio kitimą paaiškina 11.9.4 paveikslas. Kai dvinarę sistemą sudarančios žvaigždės nedengia viena kitos, jų spindesys yra didesnis (11.9.4 pav., *b*). Žvaigždėms prasilenkiant, spindesys sumažėja. Spindesio sumažėjimo intensyvumas priklauso nuo žvaigždžių tarpusavio padėties. Kai kada (11.9.4 pav., *a*) žvaigždė užtemdoma visiškai, kartais (11.9.4 pav., *c*) – iš dalies.



11.9.4 pav.



11.9.5 pav.

Dvinarės užtemdomosios žvaigždės dar vadinamos algòliais pagal savo tipiško atstovo Perséjo β pavadinimą. Senovėje arabai šią žvaigždę pavadino Algoliu (*el gul* – šėtonas).

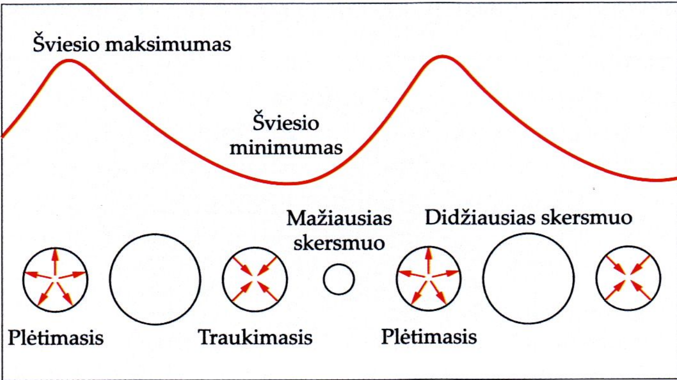
Sukdamosi viena apie kitą, dvinarės žvaigždės gali taip suartėti, kad jas sunku atskirti net pro galingus teleskopus. Jei kampinis atstumas tarp narių yra mažas, dvinarė žvaigždė atrodo kaip vienanarė. Jos narių judėjimas aplink bendrą masės centrą aptinkamas spektroskopu. Tokios dvinarės žvaigždės vadinamos spektrinėmis dvinarėmis žvaigždėmis. Jų spektre periodiškai atsiranda dvigubų linijų. Kai vienas žvaigždės narys yra taške A_1, o kitas – taške B_1 (11.9.5 pav.), spektro linijos nedvigubėja, nes abu nariai juda statmenai regėjimo spinduliui. Žvaigždėms atsidūrus taškuose A_2 ir B_2, situacija pasikeičia. Vienas narys (A_2) juda į stebėtoją, kitas (B_2) – nuo stebėtojo. Dėl to spektre matomos dvigubos linijos. Artėjančio žvaigždės nario spektrinės linijos pasislenka į violetinį spektro galą, tolstančio – į raudoną.

Analizuojant spektrines ir užtemdomąsias dvinares žvaigždes, apskaičiuojama jų masė, skersmens ilgis ir kitos svarbios charakteristikos.

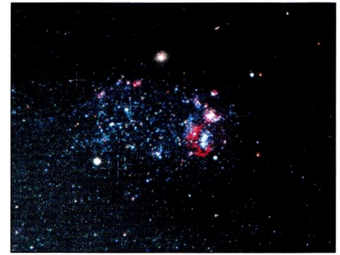
Fizinės kintamosios žvaigždės

Dvinarių žvaigždžių spindesys gali kisti ne tik dėl išorinių efektų, bet ir dėl vidinių procesų. Žvaigždės, kurių spindesys keičiasi kintant jų spinduliuojamos šviesos stipriui, vadinamos ***fìzinėmis kintamõsiomis žvaigždėmìs***. Jos skirstomos į dvi grupes: pulsuojančiąsias ir sproginėjančiąsias.

11.9.6 pav.



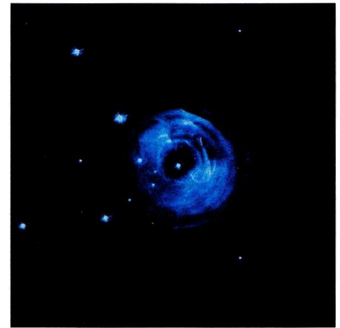
Pulsuojančiųjų žvaigždžių spindesys kinta reguliariai. Prie šių žvaigždžių priskiriamos cefeìdės, lyrìdės, cetìdės ir kt. Jos periodiškai išsiplečia ir susitraukia. Pailgėjus žvaigždės spinduliui, išoriniai jos sluoksniai išretėja ir atvėsta, todėl spinduliavimas susilpnėja (11.9.6 pav.). Traukdamasi žvaigždė tankėja ir kaista.



11.9.7 pav.

Pirmąją pulsuojančiąją žvaigždę (Cefė́jo δ; 11.9.7 pav.) 1784 m. pastebėjo anglų astronomas Džonas Gudrikas (*John Goodrick*). ***Cefeìdės*** – kintamosios žvaigždės, kurioms būdingas taisyklingas ir periodiškas spindesio kitimas. Jos priskiriamos prie B, A, F, G spektrinių klasių žvaigždžių. Šiaurinė žvaigždė yra cefeidė. Cefeidžių tyrinėjimai yra aktualūs, nes iš jų galima gauti informacijos apie atstumus Galaktikoje ir už jos ribų.

Sproginėjančiųjų žvaigždžių spindesys kinta netaisyklingai. Šios žvaigždės pasirodo staiga ir po tam tikro laiko išnyksta. Jos skirstomos į nòvas, supernòvas ir nykštùkines nòvas. Žvaigždės, kurių šviesis per trumpą laiką padidėja dešimtis tūkstančių kartų, o paskui laipsniškai sumažėja iki pradinio, vadinamos ***nòvomis***[1] (11.9.8 pav.). Nova sutviska per kelias dienas, o į pradinę būseną grįžta per keletą metų. Novos sužiba visai nelauktai. Žybsnio metu išsiskiria tiek energijos, kiek Saulė jos išspinduliuoja per milijoną metų. Žvaigždės šviesis padidėja dėl to, kad jos paviršius išsiplečia. Nuo žvaigždės atsiskiria išorinis sluoksnis, kuris 100 km/s greičiu išsisklaido į visas erdvės puses. Novomis gali tapti tik labai karštos vidutinio šviesio žvaigždės. Vadinasi, Saulė ja tapti negali. Supernovos sutviska ir užgęsta kaip novos, tačiau jų šviesio maksimumas būna šimtus kartų didesnis.



11.9.8 pav.

[1] Lot. *nova* – nauja.

Klausimai ir užduotys ??

1. Sudarykite kintamųjų žvaigždžių klasifikacinę sistemą, apimančią šioje temoje paminėtą žvaigždžių įvairovę.

2. Palyginkite užtemdomąsias dvinares žvaigždes ir cefeides. Kuo jos panašios? Kuo skiriasi?

3. Palyginkite novas ir supernovas. Nurodykite jų panašumus ir skirtumus.

11.10. Žvaigždynai. Žvaigždėlapiai

Pagrindinės sąvokos

Žvaigždýnas,
dangaũs šiáurės ašìgalis,
dangaũs pietų̃ ašìgalis,
dangaũs ašìs,
dangaũs pusiáujas,
pusiáujinė koordinãčių sistemà,
deklinãcija,
rektasceñsija,
eklìptika,
Zodiãko žvaigždýnai,
žvaigždė́lapis.

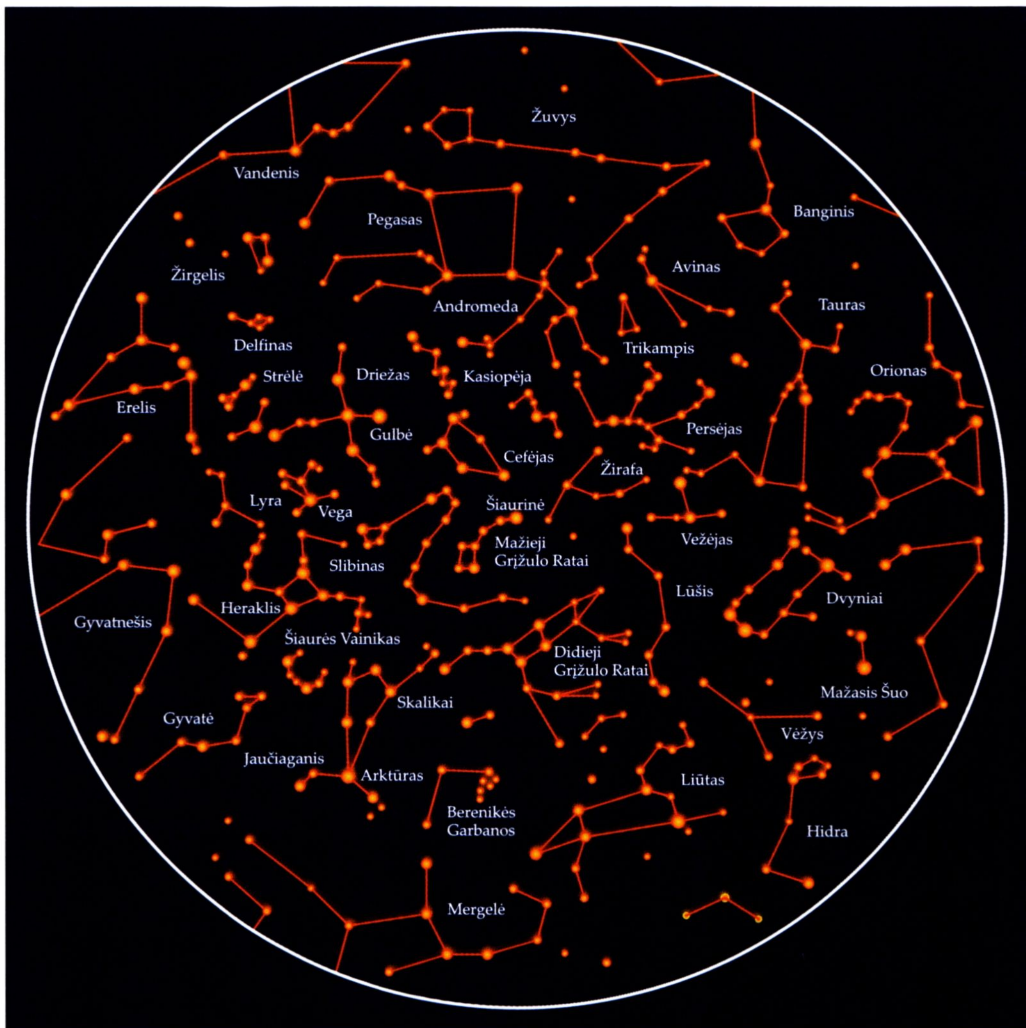
Žvaigždynai

Giedrą naktį dangus būna nusėtas žvaigždžių. Rodos, jų yra nesuskaičiuojama daugybė ir visos išsidėsčiusios bet kaip. Vis dėlto, atidžiai įsižiūrėjus, galima pamatyti tam tikras žvaigždžių grupes. Jau prieš tūkstančius metų žmonės žvaigždžių margumyne įžvelgė paukščių, daiktų ar žvėrių kontūrus. Taip radosi žvaigždynai. ***Žvaigždýnu vadinama dangaus sritis su sąlygiškai pažymėtomis ribomis.*** Žvaigždyno sritis primena kūgį, nutįsusį į begalybę. Šiuo metu yra žinomi 88 žvaigždynai, kuriuos galima rasti pagal jiems būdingą žvaigždžių išsidėstymą. Žvaigždynų dangaus skliaute ieškome mintyse sujungdami svarbiausias žvaigždes linijomis taip, kad išeitų kokia nors figūra, parodyta žvaigždėlapyje (11.10.1 pav.). Žvaigždynų žvaigždės žymimos graikiškomis raidėmis: pati šviesiausia – raide α, mažesnio šviesio – raide β ir t. t.

Žvaigždyno žvaigždės tarpusavyje nesusijusios, tai tik regimoji jų projekcija dangaus skliaute. Gretimos vieno žvaigždyno žvaigždės erdvėje gali būti labai toli viena nuo kitos. Tikras linijinis atstumas tarp jų dažniausiai nežinomas, todėl kalbama apie regimąjį kampinį nuotolį. Dauguma žvaigždynų tebevadinama kaip ir senovėje: Persė́jas, Andromedà, Pegãsas, Herãklis ir pan. Kai kurie žvaigždynai turi ir lietuviškus pavadinimus. Antai Didžiõji Meškà vadinama Didžiaĩsiais Grį̃žulo Rãtais, Oriònas – Septyniaĩs Šienpjoviaĩs, Šiáurės Vainìkas – Darželiù, Kasiopė́ja – Jùkštandžiu.

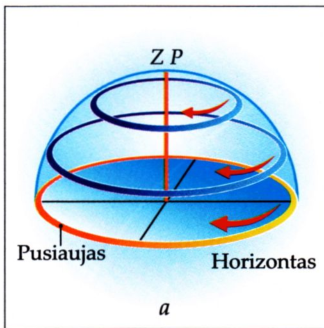
Dieną žvaigždžių nematome, nes jų šviesą nustelbia artimiausios mums žvaigždė̃s – Saulės – šviesa. Dangus atrodo kaip žydras kupolas dėl to, kad oro tankio svyravimai (dėl molekulių judėjimo) labiausiai išsklaido mėlynuosius saulės spindulius. Nuo aukštų kalnų, kur oras retesnis ir dangus tamsesnis, pačias ryškiausias žvaigždes galima matyti ir dieną.

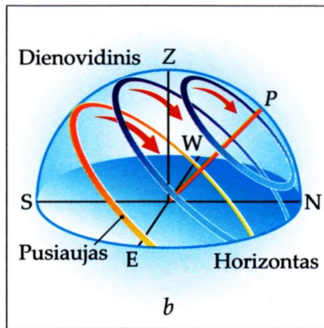
Giedrą be mėnesienos naktį dangaus šiaurės pusrutulyje plika akimi galima matyti apie 3000 žvaigž-

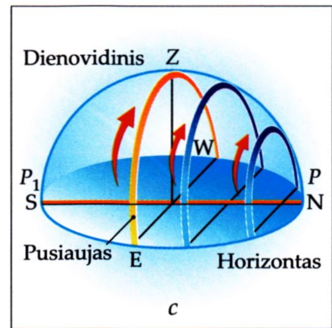


11.10.1 pav.

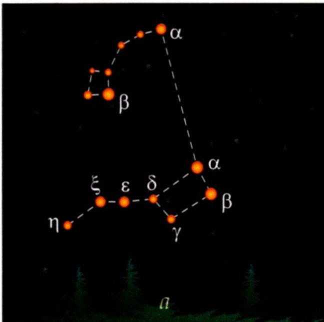
džių. Ryškiausi šio pusrutulio žvaigždynai yra Didíeji Grį̃žulo Rãtai, Vežė́jas, Slìbinas, Dvyniaĩ, Erẽlis, Gùlbė, Lyrà, Andromedà, Kasiopė́ja (žr. 11.10.1 pav.). Ilgiau tyrinėjant dangų (2–3 h), nesunku pastebėti, kad žvaigždynai, esantys rytinėje dangaus pusėje, pakyla aukščiau ir pasislenka virš horizonto į dešinę, kiti atsiduria pietuose, o buvę vakaruose nusileidžia. Šviesulių keliai per parą įvairiose geografinėse platumose atrodo skirtingai. 11.10.2 paveiksle matyti, kaip jie atrodo stebėtojui, esančiam Žemės ašigalyje (*a*), vidutinėje geografinėje platumoje (*b*) ir Žemės pusiaujyje (*c*).

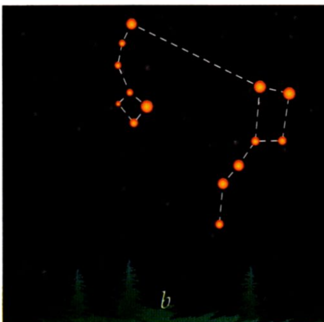






11.10.2 pav.

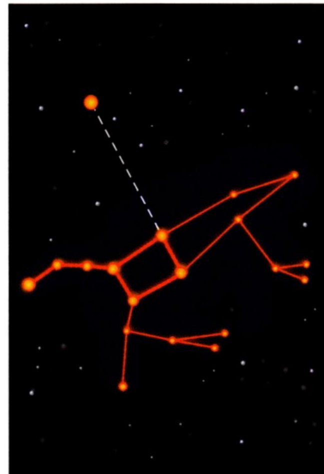




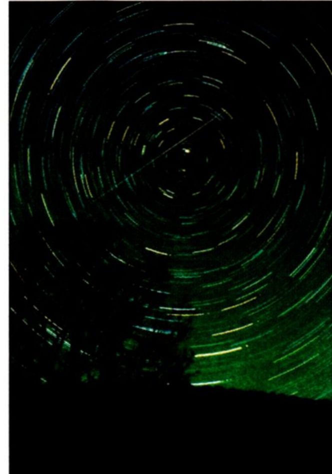
11.10.3 pav.

Dauguma žvaigždynų teka ir leidžiasi brėždami įvairaus dydžio apskritimus. Šiaurinės dangaus pusės žvaigždynai pasisuka apie Šiaurìnę žvaigždę – Mažų̃jų Grį̃žulo Rãtų α (11.10.3 pav., *a* ir *b*). Šiaurinę žvaigždę danguje nesunku rasti pagal Didžiuosius Grįžulo Ratus (11.10.4 pav.). Jos padėtis horizonto atžvilgiu beveik nekinta, nes netoli eina Žemės sukimosi ašis. Nuotraukos patvirtina, kad visos žvaigždės per parą apibrėžia apie Šiaurinę žvaigždę apskritimą (11.10.5 pav.). Žvaigždžių lankų centras vadinamas ***dangaũs šiáurės ašìgaliu***[1]. Šiaurinė žvaigždė yra arti jo. Priešingas dangaus šiaurės ašigaliui taškas vadinamas ***dangaũs pietų̃ ašìgaliu***[2]. Tiesė, jungianti abu dangaus ašigalius, yra ***dangaũs ašìs***. Arčiau Šiaurinės žvaigždės esantys žvaigždynai niekada nenusileidžia, tolimesni virš horizonto pasirodo trumpam, o nutolę dar labiau – nepateka (11.10.2 pav.).

11.10.4 pav.

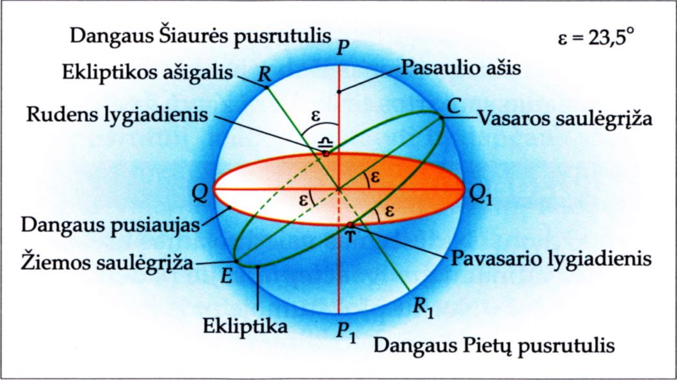


11.10.5 pav.



[1] Dangaus šiaurės ašigalis 11.10.2 ir 11.10.6 paveiksle pažymėtas raide *P*.

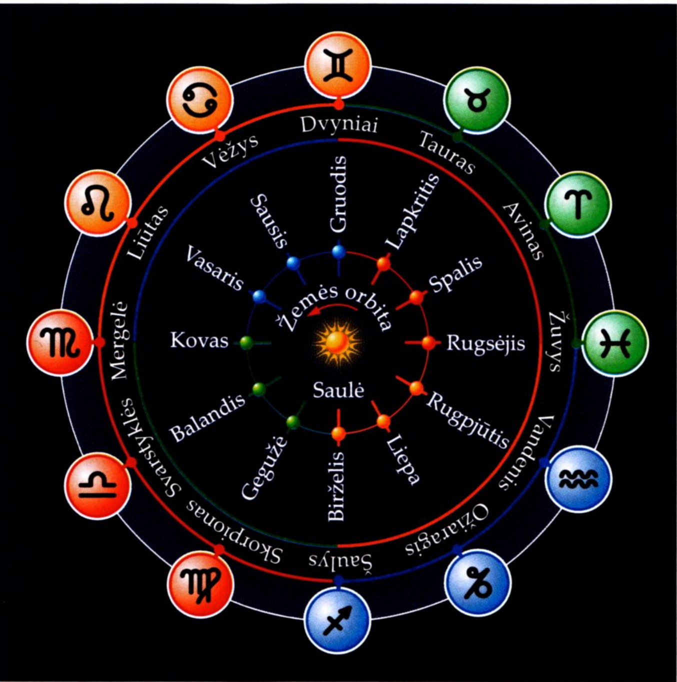
[2] Dangaus pietų ašigalis 11.10.2 ir 11.10.6 paveiksle pažymėtas raide P_1.



11.10.6 pav.

Zodiako žvaigždynai

Regimasis Saulės kelias dangaus skliautu per metus vadinamas ***eklìptika***. Judėdama ja, Saulė du kartus kerta dangaus pusiaują lygiadienių taškuose (11.10.6 pav.): kovo 21 d. (pavasario lygiadienis) ir rugsėjo 23 d. (rudens lygiadienis). Ekliptika eina per 12 žvaigždynų, kurie vadinami ***Zodiãko žvaigždýnais***[1] (11.10.7 pav.) ir sudaro vadinamąją Zodiako juostą. Jai priklauso šie žvaiždynai[2]: Žùvys, Ãvinas, Taũras, Dvyniaĩ, Vėžỹs, Liũtas, Mergẽlė, Svarstỹklės,



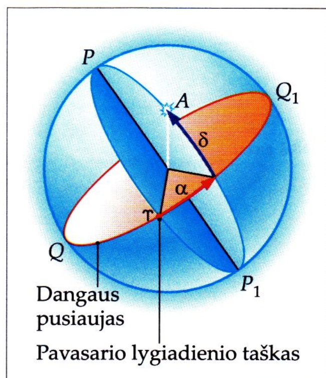
11.10.7 pav.

[1] Pavyzdžiui, jei vidurnaktį aukščiausiai virš horizonto bus Žuvų žvaigždynas, tai vidurdienį Saulė bus Mergelės žvaigždyne.

[2] Zodiako juostoje dar yra Gyvãtnešio žvaigždynas. Astrologijoje jis kartais priskiriamas prie dvylikos tradicinių Zodiako žvaigždynų.

Skorpiònas, Šaulỹs, Ožiarãgis, Vandẽnis. Kiekviename žvaigždyne Saulė būna apie mėnesį. Pavasario lygiadienio taškas γ (vienas iš dviejų ekliptikos ir dangaus pusiaujo sankirtos taškų) yra Žuvų žvaigždyne.

Žvaigždėlapiai



11.10.8 pav.

Žvaigždynų išsidėstymas vaizduojamas brėžiniuose, kurie vadinami ***žvaigždė́lapiais***. Jie padeda orientuotis danguje. Norint plokštumoje pažymėti žvaigždes, reikia žinoti jų koordinates. Per geografijos pamokas mokėtės nustatyti miestų, valstybių sostinių koordinates. Žinote, kad geografinės koordinatės nurodomos pusiaujo (geografinė platuma) ir nulinio dienovidinio (geografinė ilguma) atžvilgiu.

Žvaigždžių koordinačių horizonto atžvilgiu nustatyti neįmanoma, nes žvaigždžių padėtis nuolat kinta. Dėl to pasirenkama koordinačių sistema, kuri sukasi kartu su dangumi – ***pusiáujinė koordinãčių sistemà***. Joje žvaigždės padėtis nusakoma dangaus pusiaujo atžvilgiu. ***Dangaũs pusiáujas*** – plokštuma, statmena dangaus ašiai (11.10.6 pav.). Šviesulio kampinis atstumas nuo dangaus pusiaujo vadinamas ***deklinãcija*** δ (11.10.8 pav.; lot. *declinatio* – nuokrypis). Ji analogiška geografinei platumai. Į šiaurę nuo dangaus pusiaujo deklinacija yra teigiama, į pietus – neigiama. Kita žvaigždės koordinatė nurodoma apskritimo, išvesto per dangaus ašigalius ir pavasario lygiadienio tašką, atžvilgiu (11.10.8 pav.). Ji analogiška geografinei ilgumai ir vadinama ***rektasceñsija*** α (lot. *rectus* – tiesus, status, *acsensio* – užkopimas). Rektascensija matuojama kampu tarp dviejų apskritimų, kurių vienas išvestas per dangaus ašigalius *P* ir P_1 ir šviesulį *A*, o kitas – per dangaus ašigalius ir pavasario lygiadienio tašką. Rektascensija matuojama nuo pavasario lygiadienio taško prieš laikrodžio rodyklę, žiūrint iš šiaurės ašigalio. Dangaus pusiaujyje esančios žvaigždės teka viena paskui kitą rektascensijos didėjimo tvarka. Todėl rektascensija dažniausiai reiškiama ne kampo, bet laiko matais (žr. 7 priedą p. 309). Laiko vienetais išreikštos rektascensijos vertės nurodomos žvaigždėlapio pakraščiuose.

Dabar jau galime pateikti platesnį žvaigždėlapio apibrėžimą. ***Žvaigždėlapis – tai dangaus srities ar viso dangaus pusrutulio planas (su pusiaujinėmis***

koordinatėmis), kuriame pavaizduotos žvaigždės, jų spiečiai, galaktikos ir kiti dangaus objektai.

Žvaigždžių padėtį danguje patogiau nustatyti pagal sukamąjį žvaigždėlapį. Jis, vaizduojantis visą dangaus pusrutulį, leidžia nustatyti tą dangaus skliauto dalį, kuri matoma virš horizonto konkrečią mėnesio dieną ir valandą. Sukamąjį žvaigždėlapį sudaro paprastas žvaigždėlapis ir ant jo uždedamas skritulys su išpjova, žyminčia horizonto liniją. Horizonto išpjova yra ekscentrinė, todėl, sukant uždėtą skritulį, joje pasirodo tie žvaigždynai, kurie skirtingu laiku yra virš horizonto. Šiuo metu sukamuosius žvaigždėlapius keičia kompiuteriniai.

Žinodamas žvaigždės deklinaciją, stebėtojas gali nustatyti jos matomumo ribas. Niekada nenusileidžiančių žvaigždžių sritis randama iš 90° atimant stebėtojo geografinės platumos skaitinę vertę. Sakykime, stebėtojas yra 51° šiaurės platumos vietovėje. Iš 90° atėmę 51°, gauname 39°. Vadinasi, žvaĩgždės, esančios į šiaurę nuo +39° deklinacijos, niekada nenusileidžia, o esančios į pietus nuo –39° deklinacijos niekada nepateka. Žiūrint iš mūsų pavyzdyje paminėtos platumos (t. y. Lòndono geografinės platumos), Vežéjo Kapelà (deklinacija maždaug +46°) niekada nenusileidžia, Arktū̃ras kurį laiką būna žemiau horizonto, o Kanòpas (Laĩvo Kìlio α, kurios deklinacija –53°) niekada virš jo nepakyla.

Šiaurės pusrutulyje gyvenantys žmonės negali matyti dangaus Pietų pusrutulio žvaigždynų ir kitų dangaus kūnų. Pavyzdžiui, nematomas Pietų̃ Krỹžiaus žvaigždynas, Magelãno Dẽbesys, taip pat labai ryškus Paũkščių Tãkas.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname žvaigždynu?

2. Kokie žvaigždynai priklauso Zodiako juostai?

3. Kodėl žvaigždžių koordinačių negalima nustatyti horizonto atžvilgiu? Kokia koordinačių sistema naudojama žvaigždžių padėčiai nustatyti?

4. Ką vadiname šviesulio deklinacija; rektascensija?

5. Kodėl rektascensija dažniausiai reiškiama ne kampo, bet laiko matais?

6. Kam lygi pavasario lygiadienio taško deklinacija ir rektascensija?

7. Pagal ryškiųjų žvaigždžių koordinates (žr. 7 priedą p. 309) žvaigždėlapyje raskite kai kurias žvaigždes.

8. Žvaigždėlapyje (11.10.1 pav.) pasirinkite kurią nors ryškią žvaigždę ir pagal ryškiųjų žvaigždžių duomenų lentelę (žr. 7 priedą p. 309) nustatykite jos koordinates.

9. Pagal žvaigždėlapį raskite keletą žvaigždynų naktinio dangaus pietinėje pusėje. Ieškodami žvaigždynų, žvaigždėlapį laikykite taip, kad jame esantys šiaurės, rytų ir kiti taškai atitiktų horizonto padėtį vietovėje. Įsidėmėkite Didžiųjų ir Mažųjų Grįžulo Ratų žvaigždynus, Cefėjo, Kasiopėjos, Driežo, kai kuriuos kitus žvaigždynus. Radę vieną žvaigždyną, eikite prie kito.

10. Ar iš Marso žvaigždynai atrodytų taip pat kaip iš Žemės? Atsakymą pagrįskite.

11*. Remdamiesi 7 priedu (žr. p. 309), nustatykite, kokiems žvaigždynams priskiriamos žvaigždės, kurių pusiaujinės koordinatės yra tokios:

a) $\alpha_1 = 4^h33^m$, $\delta_1 = +16°25'$;
b) $\alpha_2 = 16^h26^m$, $\delta_2 = -26°19'$;
c) $\alpha_3 = 20^h40^m$, $\delta_3 = +45°06'$.

12*. Kaip pasikeistų dienos ilgumas įvairiose Žemės vietose ir įvairiais metų laikais, jeigu Žemės sukimosi ašis būtų statmena ekliptikos plokštumai? Kaip tai paveiktų metų laikus; klimatą?

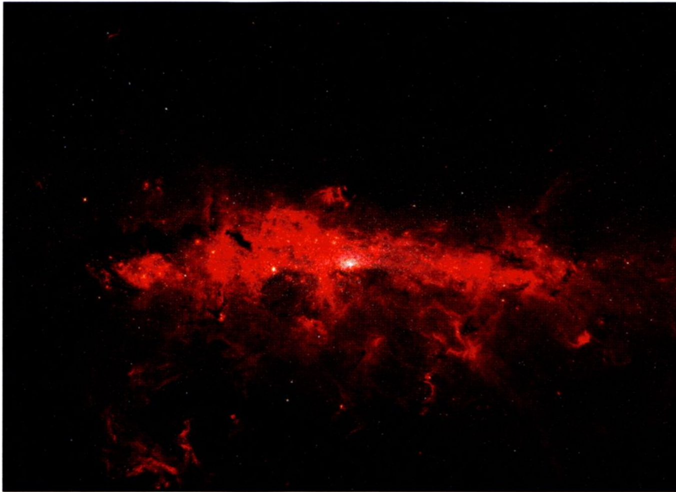
Pagrindinės sąvokos

Paũkščių Tãkas,
Galãktika,
žvaigždžiũ spiẽčiai,
tarpžvaigždìnė mẽdžiaga,
tamsùsis ũkas,
ãtspindžio ũkas,
emìsinis ũkas,
planètiškasis ũkas.

11.11. Mūsų Galaktika

Paukščių Takas ir Galaktika

Nakties danguje nusidriekusi plati ir netaisyklingos formos šviesos juosta vadinama ***Paũkščių Takù*** (11.11.1 pav.). Ypač gerai ji matoma ankstyvą rudenį. Pagal ją orientuojasi paukščiai, skrisdami žiemoti į šiltuosius kraštus. Mūsų protėviai Paukščių Taką dar vadindavo vėlių keliu.

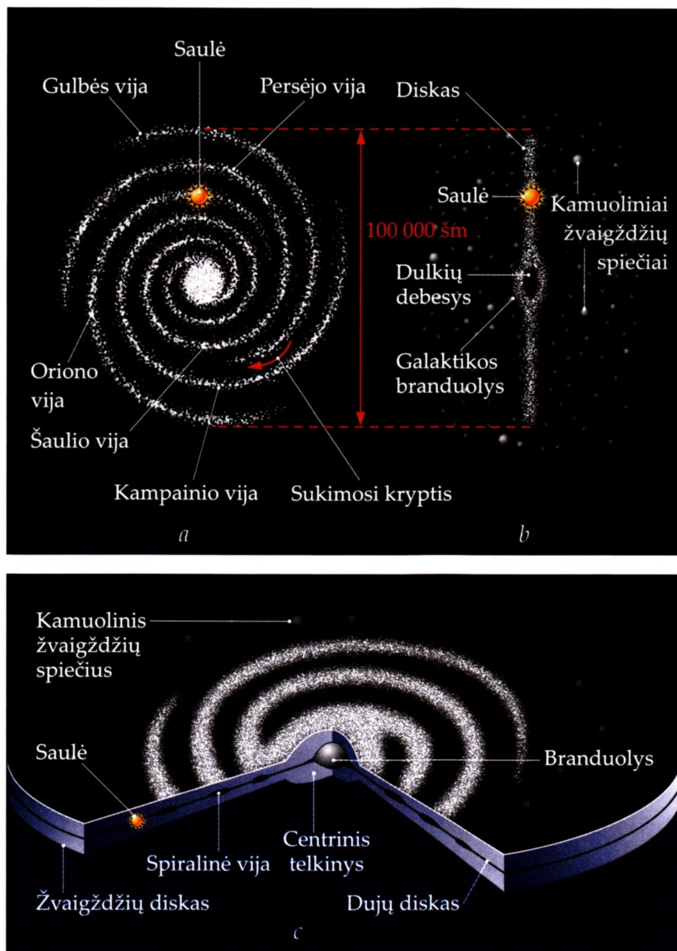


11.11.1 pav.

Pažvelgus pro žiūroną, matyti, kad Paukščių Taką sudaro daugybė blyškių žvaigždžių, labai artimų viena kitai mūsų regėjimo lauke. Kai kur žvaigždės sutankėja, tarsi sudarydamos debesis. Tai silpnos tolimosios žvaigždės. Gulbės žvaigždyne ties Denèbo žvaigžde Paukščių Takas išsišakoja (11.11.2 pav.). Iš tikrųjų šis išsišakojimas yra tariamas. Taip jis atrodo dėl to, kad Paukščių Tako žvaigždes užstoja kosminės dulkės. ***Paukščių Takas – tai pagrindinė mūsų labai susiplojusios Galaktikos*** (gr. *galaktikos* – pieniškas, pieninis) ***dalis.*** Kartais neteisingai manoma, kad būtent jis ir yra visa mūsų Galaktika. Daugumą Galaktikos žvaigždžių matome Paukščių Tako juostoje, bet jos nesudaro visos Galaktikos. ***Galãktika – didžiulė erdvinė gravitacijos susieta žvaigždžių, tarpžvaigždinių dujų ir dulkių ūkų sistema*** (11.11.3 pav.).

11.11.2 pav.





11.11.3 pav.

11.11.3 paveiksle, *a*, pateiktas Galaktikos vaizdas iš viršaus. Matyti, kaip žvaigždės išsidėsčiusios ilgomis vijomis, besivyniojančiomis nuo Galaktikos branduolio. Spiralinių vijų padėtys nustatytos pagal dujų debesų spinduliuojamas radijo bangas. 11.11.3 paveiksle, *b* – Galaktikos vaizdas iš šono. Jis primena didžiulį iškiląjį lęšį plonais pakraščiais. 11.11.3 paveiksle, *c* – Galaktikos pjūvis. Arti centro Galaktikos storis siekia apie 3000–6000 šm, o pakraščiuose – vos kelis šimtus šviesmečių. Šaulio žvaigždyne Paukščių Takas yra plačiausias ir šviesiausias. Ten – Galaktikos centras. Galaktikos centre yra jos branduolys – didžiulis tankus žvaigždžių telkinys. Saulė (geltonoji nykštukė) yra spiralinės vijos pakraštyje nutolusi maždaug 9 kpc atstumu nuo Galaktikos centro. Apie Galaktikos centrą ji apsisuka vieną kartą per 230 mln. metų.

Žvaigždžių spiečiai

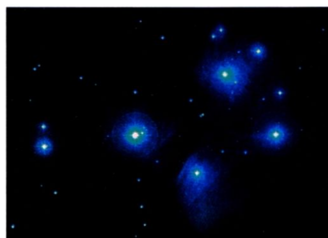
Galaktika susideda ne tik iš pavienių žvaigždžių, bet ir iš jų sankaupų – ***žvaigždžių̃ spiẽčių***. Jie skirstomi į dvi rūšis: padrikuosius ir kamuolinius.

- ***Padrikúosius***, arba galãktinius, ***spiečiùs*** sudaro dešimtys arba šimtai mažai koncentruotų, daugiausia pagrindinės sekos žvaigždžių. Padrikųjų spiečių pavyzdys – Hiãdų ir Sietýno (Plejãdų) spiečiai Tauro žvaigždyne (11.11.4 pav.). Į Sietyną žiūrėdami pro teleskopą, vietoj šešių žvaigždžių matome plotą, ištisai nusėtą žvaigždžių.

Padrikieji spiečiai išsidėstę Galaktikos diske. Šie spiečiai nėra stabilūs. Veikiami Galaktikos žvaigždžių traukos, jie suyra. Padrikieji spiečiai gyvuoja ne daugiau kaip milijardą metų.

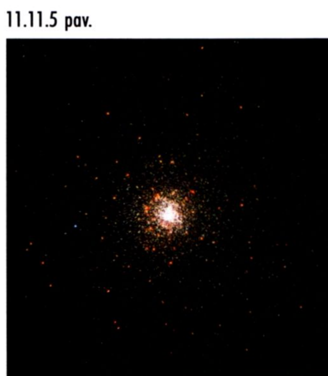
- ***Kamuolìniai spiẽčiai*** yra simetriški dariniai, siejantys šimtus tūkstančių žvaigždžių. Šie spiečiai koncentruoti. Kadangi jie toli, pro teleskopą atrodo kaip ūkanotos dėmės (11.11.5 pav.).

Kamuoliniai spiečiai pasiskirstę netolygiai. Daugiausia jų – Galaktikos centre, patys tolimiausi – ties Galaktikos riba. Mums geriausiai žinomas kamuolinis spiečius M13 Heraklio žvaigždyne. Jis nuo Žemės nutolęs 26 700 šm.



11.11.4 pav.

11.11.5 pav.



Tarpžvaigždinė medžiaga

Tarpžvaigždìnė medžiaga – tai atomų, jonų, elektronų bei molekulių dujos, taip pat dulkės, užpildančios tarpžvaigždinę erdvę. Didžiąją dalį šios medžiagos sudaro dujos (≈ 99 % masės), dulkių yra labai mažai (≈ 1 %).

Taržvaigždinė medžiaga erdvėje yra nevienalytė: vainikinės dujos (arba tarpdebesinės dujos) ir dujų bei dulkių debesys. ***Vainìkinės dùjos*** – labiausiai išretėjusi tarpžvaigždinės medžiagos dalis. Kiekvienai dalelei čia tenka šimtai ar net daugiau kaip tūkstantis kubinių centimetrų tuščios erdvės. Tarpžvaigždinės medžiagos debesis sudaro gerokai didesnio tankio dujų telkiniai su nedidelėmis dulkių priemaišomis. Debesys labai įvairūs. Sąlygiškai jie skirstomi į difuzinius (sudarytus beveik vien iš dujų atomų) ir molekulinius (susidedančius iš molekulių ir atomų). Jų matmenys siekia nuo kelių iki keliolikos šviesmečių.

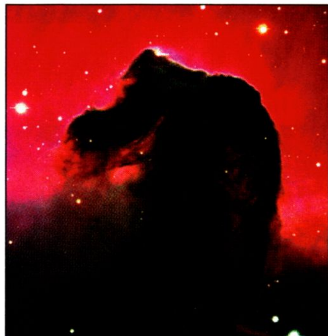
Tarpžvaigždinėje erdvėje aptinkama ir lauko formos materijos: gravitacijos ir magnetinių laukų, elektromagnetinių ir gravitacinių bangų.

Didžiąją dalį tarpžvaigždinių dujų telkinių masės (≈ 70 %) sudaro neutralus, molekulinis ir jonizuotas vandenilis. Galaktikoje daugiausia yra neutralaus vandenilio. Jis nešviečia ir yra nematomas, tačiau skleidžia 21 cm ilgio radijo bangas. Apie 50 % tarpžvaigždinio vandenilio telkiasi spiralinėse Galaktikos vijose. Kita jo dalis (molekulių pavidalu) sudaro molekulinius debesis.

Be vandenilio, tarpžvaigždinėje erdvėje yra kitų cheminių elementų atomų, molekulių. Jie aptinkami pagal žvaigždžių sugerties spektrų linijas. Helio atomai sudaro 25–30 % visos dujų masės, o kitų cheminių elementų (anglies, geležies, deguonies, magnio, sieros ir kt.) – kelis jos procentus. Tarpžvaigždinių dujų telkiniuose randama ir sudėtingų molekulių. Manoma, kad molekulių tarpžvaigždinėse dujose atsiranda šiais būdais: molekulės susidaro dulkelių paviršiuose ir nuo jų atitrūksta; atlekia iš vėsesnių žvaigždžių atmosferų; susidaro pačiose dujose, susiduriant jų atomams ir molekulėms. Molekulės tarpžvaigždinėje medžiagoje ne tik susidaro, bet ir, veikiamos ultravioletinės bei rentgeno spinduliuotės ir kitų veiksnių, disocijuoja, suyra.

Tarpžvaigždinės dulkės turi geležinį, grafitinį arba silikatinį branduolį, padengtą kietu amoniako, metano, vandens ir kitų priemaišų apvalkalu. Tyrimai rodo, kad tarpžvaigždinės dulkės telkiasi 200–3000 pc storio sluoksniu abipus Galaktikos plokštumos. Tankūs tarpžvaigždinių dulkių ir dujų telkiniai, sugeriantys žvaigždžių šviesą, vadinami ***tamsiaĩsiais ūkaĩs***. Ūkai yra milžiniško dydžio, tačiau sudaryti iš labai retos medžiagos. Žinomiausias tamsusis ūkas – Árklio galvõs ũkas Septynių Šienpjovių žvaigždyne (11.11.6 pav.).

11.11.6 pav.



Tarpžvaigždinių dujų ir dulkių debesys, atspindintys gretimų žvaigždžių šviesą, vadinami ***ãtspindžio ūkaĩs*** (11.11.7 pav., *a*). Šių ūkų spektras būna toks pat kaip ir jį apšvietusios žvaigždės. Atspindžio ūke skendi Sietyno spiečiaus žvaigždės (11.11.4 pav.).

Sužadinti ir švytintys ūkai vadinami ***emìsiniais ūkaĩs***. Juos švytėti verčia žvaigždė arba žvaigždžių

Žvaigždė
Ūkas
a

Ūkas
Žvaigždė
b

11.11.7 pav.

11.11.8 pav.

11.11.9 pav.

grupė, spindinti netoliese arba skendinti tuose ūkuose (11.11.7 pav., *b*). Karštos žvaigždės jonizuoja ūko vandenilio (o kartais ir helio) dujas, sužadindamos jų švytėjimą. Gerai žinomas emisinis ūkas yra Septynių Šienpjovių žvaigždyne (11.11.8 pav.).

Tarpžvaigždinėje erdvėje tebešvyti supernovų sprogimų ištaškyta žvaigždžių medžiaga, kuri vadinama supernovų likučių ūkais. Nuo labai išsipūtusių žvaigždžių atitrūkę išoriniai sluoksniai sudaro ***planètiškuosius ūkùs***: jau minėtą Krãbo ū̃ką (žr. 11.8.4 pav.), Akiẽs rainẽlės (11.11.9 pav.), Sraĩgės (11.11.10 pav.), Skruzdėlė̃s (11.11.11 pav.) ū̃ką.

11.11.10 pav.

Galaktikos magnetinis laukas

Galaktikos magnetinio lauko linijos driekiasi išilgai spiralinių vijų. Jis beveik 100 000 kartų silpnesnis už Žemės magnetinį lauką. Silpnas Galaktikos magnetinis laukas nedaro jokios įtakos žvaigždėms, tačiau veikia tarpžvaigždinių dulkių ir kosminių spindulių judėjimą. Šis laukas tam tikru būdu orientuoja tarpžvaigždines dulkes. Tamsieji dulkių debesys dėl jo poveikio yra ištįsę beveik lygiagrečiai su Galaktikos pusiauju. Dėl magnetinio lauko poveikio elektringosios kosminės spinduliuotės dalelės juda uždaromis kreivėmis ir nepabėga iš Galaktikos.

11.11.11 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Kas yra Paukščių Takas? Remdamiesi istorijos ir etninės kultūros žiniomis, papasakokite, kaip jis buvo suprantamas tautosakoje.

2. Apibūdinkite mūsų Galaktikos sandarą. Nurodykite Saulės padėtį šioje Galaktikoje.

3. Išvardykite objektus, sudarančius mūsų Galaktiką.

4. Kodėl šviečia atspindžio ūkai?

5. Kodėl švyti emisiniai ūkai?

6. Žvaigždėlapyje (11.10.1 pav.) raskite žvaigždynus, kuriais driekiasi Paukščių Takas.

Pagrindinės sąvokos

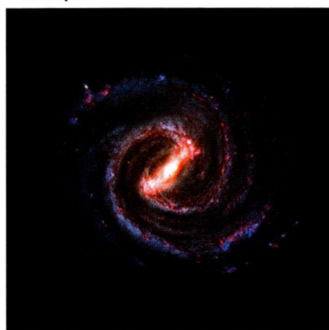
Spirãlinės galãktikos, elìpsinės galãktikos, netaisyklìngosios galãktikos, aktỹviosios galãktikos, kvazãrai, rãdijo galãktikos, Metagalãktika, Visãtos plėtìmasis.

11.12. Kitos galaktikos. Galaktikų sistemos

Galaktikų tipai

Aptarta mūsų Galaktika Visatoje yra ne vienintelė. Šiuolaikiniai galaktikų tyrimai prasidėjo 1924 m., kai amerikiečių mokslininkas Edvinas Hablis (*Edwin Hubble*, 1889–1953) įrodė, kad egzistuoja nepriklausančios mūsų Galaktikai žvaigždžių sistemos. Šiuo metu astronomijoje taikoma XX a. pradžioje Hablio pasiūlyta galaktikų klasifikacija, grindžiama galaktikų fotografiniu vaizdu. Pagal formą ir kitas savybes galaktikos skirstomos į tris tipus: spiralines, elipsines ir netaisyklingąsias galaktikas.

11.12.1 pav.



Dauguma matomų galaktikų yra spiralinės. Mūsų Galaktika, taip pat galaktika, esanti Andromèdos žvaigždýne, priskiriama prie labai didelių spiralinių galaktikų (11.12.1 pav.). ***Spirãlinė galãktika*** – tai ryškus objektas su daugybe jaunų žvaigždžių vijose, besisukančiose apie masės centrą. Spiralinės galaktikos turi centrinį telkinį, aplink kurį sukasi spiralinės vijos. Jų sukimosi periodas – šimtai milijonų metų, masė – nuo 10^9 iki 10^{11} Saulės masių. Spiralinių galaktikų vi-

jos sudarytos iš karštųjų žvaigždžių, cefeidžių, supermilžinių, padrikųjų spiečių ir dujų ūkų. Kai kurių šios klasės galaktikų vijos labai menkos, o centras didelis, kitoms būdingos ryškios plačios vijos ir neryškus ar net neįžiūrimas centras.

Yra galaktikų, kurios panašios į žvaigždžių spiečius, tik daug didesnės. Jos vadinamos ***elìpsinėmis galãktikomis***. Tai – rutulio arba elipsoido formos žvaigždžių kamuoliai (11.12.2 pav.). Šio tipo galaktikos sukasi lėčiau negu spiralinės, yra beveik nesusiplojusios. Žvaigždės čia susitelkusios tankiau negu spiralinėse galaktikose. Jas sudaro senos ir vidutinio amžiaus žvaigždės. Elipsinėse galaktikose yra mažai tarpžvaigždinės medžiagos debesų, iš kurių gali formuotis naujos žvaigždės, nėra nei žvaigždžių supermilžinių, nei tamsiųjų bei emisinių ūkų.



11.12.2 pav.

XVI a. Magelano ekspedicijos metu dangaus Pietų pusrutulyje pastebėti du dideli netaisyklingos formos žvaigždžių debesys, kurie buvo pavadinti Didžiúoju ir Mažúoju Magelãno Debesimìs. Jie priskiriami prie ***netaisyklìngųjų galãktikų*** – netaisyklingos formos žvaigždžių sistemų (11.12.3 pav.). Šio tipo galaktikos yra mažesnės už spiralines ir elipsines, turi daug jaunų žvaigždžių, kuriose negausu metalų, taip pat pakankamai dujų ir dulkių, iš kurių susidaro naujos žvaigždės.

11.12.3 pav.



Aktyviosios galaktikos

Egzistuoja spiralinės ir elipsinės galaktikos, kurios šalia žvaigždžių spinduliuojamos šiluminės energijos skleidžia nešiluminę energiją. Tokios galaktikos vadinamos ***aktyviõsiomis galãktikomis***. Nešiluminė energija išsiskiria labai mažoje, centrinėje, jų dalyje. Dėl to pačiame galaktikos centre gali būti matoma didelio skaisčio dėmelė, kurios spinduliavimo galia prilygsta visos galaktikos spinduliavimo galiai, o kartais ją nustelbia. Aktyviųjų galaktikų grupei priklauso ***rãdijo galãktikos*** ir ***rãdijo kvazãrai***. Jos turi po dvi didžiules į priešingas puses trykštančias elementariųjų dalelių, atomų branduolių ir fotonų čiurkšles. Čiurkšlių viršūnės yra išplitusios ir virtusios dideliais, dažniausiai didesniais už pačią galaktiką, plazmos debesimis – plazmoidais. Jie skleidžia ištisinį spektrą, apimantį ne tik dekametrines ir metrines



11.12.4 pav.



11.12.5 pav.

bangas, bet ir infraraudonosios spinduliuotės, regimosios šviesos bei ultravioletinės spinduliuotės sritis.

- Prie radijo galaktikų priskiriamos elipsinės galaktikos supermilžinės, spinduliuojančios radijo bangas (11.12.4 pav.). Jas skleidžia centrinis radijo šaltinis (sritis, kurios didumas prilygsta žvaigždžių užpildytos galaktikos tūriui) ir du plazmoidai – išoriniai radijo šaltiniai. Didžiąją radijo bangų energijos dalį spinduliuoja plazmoidai. Vadinasi, radijo bangos sklinda iš nepaprastai didelio tūrio. Jis šimtus ar net tūkstančius kartų didesnis už žvaigždinį galaktikos tūrį, iš kurio spinduliuojama žvaigždžių šviesa.
- Kvazarai – labai stipriai spinduliuojantys aktyviųjų galaktikų branduoliai (11.12.5 pav.). Tai patys galingiausi žinomi Visatos spinduoliai. Kvazarai savo šviesiu pralenkia net pačią galaktiką. Dėl to jie atrodo kaip žvaigždės ir dar vadinami kvazižvaigždìniais rãdijo šaltìniais (*quasar* < *quasustellaradiosource* – kvazižvaigždinis radijo šaltinis). Kvazarą supančią galaktiką sunku pastebėti. Skiriamos dvi kvazarų rūšys: rãdijo kvazãrai ir tylíeji kvazãrai. Manoma, kad radijo kvazarai yra elipsinių galaktikų branduoliai, o tylieji – spiralinių. Tylieji kvazarai neskleidžia galingų čiurkšlių su plazmoidais, jiems nebūdingas stiprus radijo spinduliavimas.

Apibendrinant radijo bangų spinduliavimą Visatoje, galima teigti, kad beveik visos galaktikos yra radijo bangų šaltiniai. Tik dauguma tų šaltinių labai silpni.

Metagalaktika

Galaktikos, kaip ir žvaigždės, gali sudaryti dvinares ir daugianares galaktikų sistemas, taip pat sambūrius – spiečius ir superspiečius, kurių narius kartu laiko gravitacijos jėga. Galaktikų spiečiai būna padriki ir kamuoliniai, susidedantys iš dešimčių, o kartais ir tūkstančių narių. Mūsų Galaktika taip pat yra galaktikų spiečiaus narys. Ji priklauso Vietinei galaktikų grupei. Be mūsų Galaktikos, šioje grupėje dar yra Andromèdos galãktika, Trìkampio galãktika, abu Magelano Debesys ir daugiau kaip 20 mažų žvaigždžių sistemų, vadinamų nykštukinėmis galaktikomis.

Artimiausias Vietinės galaktikų grupės kaimynas – padrikasis galaktikų spiečius, matomas Mergelės žvaigždyne (11.12.6 pav.). Atstumas nuo mūsų iki jo –

apie 20 Mpc. Danguje Mergelės spiečius užima net 14 kartų didesnį plotą negu Mėnulis. Šios galaktikos yra labai toli ir plika akimi nematomos. Į Mergelės spiečių susibūrę keletas tūkstančių galaktikų. Visos kartu jos sukuria labai stiprų gravitacijos lauką, kuris veikia Vietinės grupės judėjimą. Visa stebima galaktikų ir jų spiečių sistema vadinama ***Metagalãktika***.

Spektrine analize nustatyta, kad galaktikos tolsta nuo mūsų ir vienos nuo kitų į visas puses tuo greičiau, kuo didesnis jų atstumas. Toks procesas, apimantis visą regimąją Visatos dalį, vadinamas ***Visãtos plėtìmusi***. Visatos plėtimąsi apibūdina dėsnis, kurį 1929 m. nustatė jau temos pradžioje minėtas amerikiečių astronomas Edvinas Hablis. Hablio dėsnis teigia, kad visos galaktikos tolsta vienos nuo kitų tuo didesniu greičiu, kuo didesnis atstumas tarp jų:

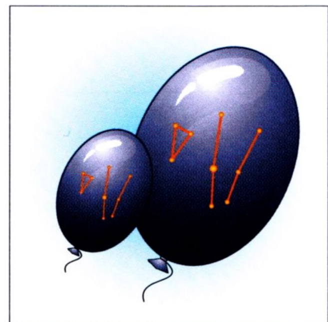
$$v = HR. \qquad (11.2)$$

11.2 formulės koeficientas H vadinamas Hablio konstanta. Skirtingais metodais nustatant nuotolius iki galaktikų, Hablio konstantos vertė gaunama tarp 90 km/(s · Mpc) ir 50 km/(s · Mpc). Labiausiai tikėtina jos vertė yra H = 70 km/(s · Mpc). Plečiantis Visatai, pačios galaktikos ir jas sudarantys objektai (žvaigždės, planetos ir kt.) nesiplečia.

Hablio pasiūlytą Visatos plėtimosi modelį galima nesunkiai pavaizduoti dvimačiu piešinėliu. Ant oro baliono reikia pažymėti kokius nors du objektus, pavyzdžiui, Trikampio galaktiką ir Andromedos galaktiką (11.12.7 pav.). Pučiant balioną, žymės tolsta viena nuo kitos greičiu, kuris proporcingas pradiniam jų nuotoliui. Šis pavyzdys padeda geriau suprasti, kad kiekvienas Visatos objektas juda tolyn nuo kiekvieno kito objekto.



11.12.6 pav.



11.12.7 pav.

Klausimai ir užduotys

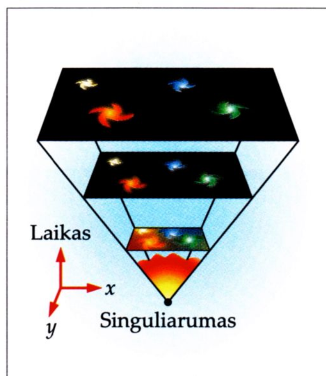
1. Apibūdinkite spiralines, elipsines ir netaisyklingąsias galaktikas.

2. Kas sudaro Metagalaktiką?

3. Tardami, kad Hablio konstanta H = 100 km/(s · Mpc), apskaičiuokite nuotolį iki galaktikos, žinodami, kad ji tolsta 10 000 km/s greičiu. (100 Mpc)

11.13. Visatos evoliucija. Kosmoso tyrimai

Visatos raida

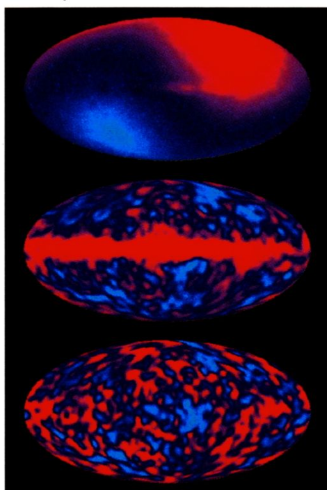


11.13.1 pav.

Visata plečiasi, jos objektai tolsta vieni nuo kitų tuo greičiau, kuo didesnis atstumas tarp jų. Kad ir kur būtų stebėtojas, jis turi pripažinti, jog visur galioja Hablio dėsnis. Iš šio dėsnio išplaukia tokia išvada: Visatoje visi nuotoliai priklauso nuo laiko vienodu santykiu. Vadinasi, praeityje buvo momentas, kai jie buvo dvigubai mažesni negu dabar, dar anksčiau – trigubai mažesni. Peršasi išvada, kad Visata pradėjo plėstis iš mažo taško, o plėtimosi pradžia buvo panaši į sprogimą.

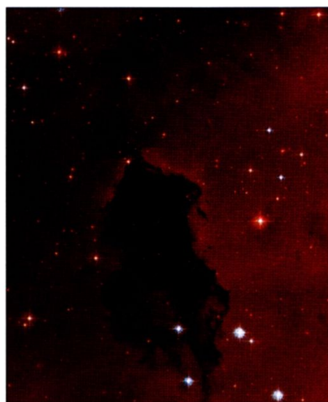
Sprogimo hipotezę belgų kosmologas Žoržas Lemetras (*Georges Lemaitre*) iškėlė 1920 m., kai dar nebuvo žinomas pats Visatos plėtimosi faktas. 1922 m. rusų fizikas Aleksandras Fridmanas matematiškai įrodė, kad Visata turi plėstis arba trauktis. Hablio dėsnis buvo suformuluotas jau po Fridmano mirties. Hipotezė apie Visatos plėtimąsi iš vieno taško buvo pavadinta Didžiúoju Sprogimù. Pasak jos, Visata turėjo pradėti formuotis iš vieno taško, būdama begalinio tankio. Pradinė Visatos būsena buvo pavadinta singuliariąja (lot. *singularis* – atskiras, savotiškas, ypatingas), o taškas, iš kurio pradėjo plėstis Visata, – singuliariúoju taškù (11.13.1 pav.).

11.13.2 pav.



Didžiojo Sprogimo hipotezė kai kuriais atvejais sunkiai paaiškinama. Pavyzdžiui, begalinio tankio materija negali egzistuoti. Visatos plėtimosi pradžioje tūris negalėjo būti lygus nuliui. Antra vertus, nauji mokslo atradimai neprieštarauja Didžiojo Sprogimo hipotezei. 1965 m. JAV radiofizikai Arnas Penzijas (*Arno Penzias*) ir Robertas Vilsonas (*Robert Wilson*) užregistravo foninę kosminę radijo spinduliuotę. Už šį atradimą 1978 m. jie buvo apdovanoti Nobelio premija. 11.13.2 paveiksle pateikta Visatos nuotrauka foninės spinduliuotės diapazone. Skirtingi atspalviai rodo, kad šios spinduliuotės temperatūra skiriasi. Visatos foninė spinduliuotė nėra tolygi.

Foninė kosminė radijo spinduliuotė papildo Didžiojo Sprogimo hipotezę. Ši atrasta spinduliuotė nesusijusi su jokiu dangaus kūnu. Toks spinduolis gali būti po sprogimo atsiradusi medžiaga, iš kurios nėra susidariusios žvaigždės ar galaktikos. Manoma, kad foninė kosminė spinduliuotė plėtėsi kartu su Metagalaktika. Ji sklinda ne iš vieno taško, bet iš visų Visatos pusių. Matyt, ji daugybę kartų keitė savo sklidimo kryptį, atsispindėdama nuo elementariųjų dalelių. Kas buvo iki Visatos plėtimosi, kada baigsis plėtimasis, kosmologija kol kas atsakyti negali.


11.13.3 pav.

Dangaus kūnų formavimasis

Manoma, kad žvaigždės yra susidariusios iš tankios dujų arba dujų ir dulkių medžiagos. Šviesiųjų ūkų fone susiformavę ir stebimi labai maži, ypač tankūs dulkių ūkai vadinami globulėmis (11.13.3 pav.). Galbūt globulės ir yra žvaigždžių užuomazgos.

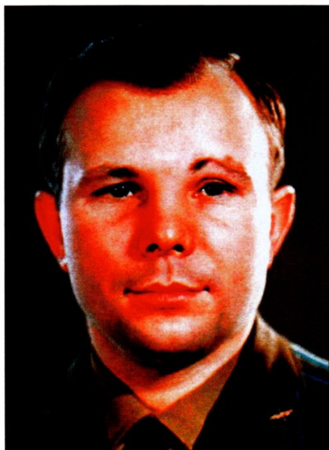
Prie kai kurių žvaigždžių gali būti planetų. Pastebėta, kad tos žvaigždės vos pastebimai, periodiškai skrieja aplink sunkio centrą. Nematomas jų palydovas yra mažos masės ir gali būti planeta arba planetų grupė. Akivaizdu, kad Saulės sistema, taip pat ir Žemė nėra kažkoks ypatingas Visatos darinys.

Saulės sistemos planetų susidarymą aiškina skirtingos hipotezės. Pasak Šmidto hipotezės, milžiniškas šaltas dujų ir dulkių debesis, sukdamasis apie Saulę, susiplojo. Dulkelės išsidėstė disko pavidalu, jų orbitos pasidarė apskritos ir vienos krypties. Stambios dulkelės pritraukė prie savęs smulkesnes. Greičiausiai didėjo stambiausių dalelių masė. Taip atsirado keletas didelių planetų. Pagal šią hipotezę Žemė niekada nebuvo nei dujinė, nei karšta ir skysta, o atsirado iš šaltos dujų ir dulkių masės. Gilesni Žemės sluoksniai pradėjo kaisti skylant radioaktyviesiems elementams.

Sunku nuspėti, kiek žvaigždžių turi planetas ir ar gali jose egzistuoti gyvybė. Mūsų Galaktikoje greičiausiai egzistuoja ne viena civilizacija.

Kosminės kelionės

Kosminiams tyrimams naudojamos raketos. Manoma, kad pirmąsias raketas sukonstravo senovės kinai, XIV a. jas pradėjo kurti korėjiečiai. Europą jos pasiekė



Jurijus Gagarinas

XIV a. Naują postūmį raketinės technikos plėtrai suteikė Kazimiero Semenavičiaus (apie 1600–1651 m.) darbai. Jums jau žinomas jo veikalas „Didysis artilerijos menas" buvo Konstantino Ciolkovskio bibliotekoje.

1903 m. rusų mokslininkas Konstantinas Ciolkovskis paskelbė ciklą mokslinių straipsnių, kuriuose suformulavo kosmonautikos pagrindus.

1949 m. JAV paleido į kosmosą pirmąją raketą, kuri pakilo į 400 m aukštį. Pirmasis dirbtinis Žemės palydovas „Sputnik 1" paleistas 1957 m. buvusioje TSRS. 1961 m. Jurijus Gagarinas tapo pirmuoju planetos kosmonautu, erdvėlaiviu „Vostok 1" apskriejusiu Žemę 180–301 km aukštyje. Nuo šio pirmojo pilotuojamo skrydžio iki 2005 m. įvyko 245 skrydžiai į kosmosą. Čia pabuvojo 300 kosmonautų iš įvairių pasaulio šalių. Paminėtinas 1969 m. pilotuojamas skrydis į Mėnulį. Tais metais liepos 20 d. 2 h 56 min 20 s Armstrongas ištarė visiems laikams istorijoje likusius žodžius: „Tai mažas žmogaus žingsnis, bet milžiniškas visos žmonijos šuolis." 11.13.4–11.13.6 paveiksluose matome šios ekspedicijos vaizdus.

1971 m. dirbtinis palydovas „Mariner 9" pasiekė Marsą, 1972 m. „Pioneer 10" – Jupiterį. Praskriedamas pro Jupiterį 31 400 km atstumu, pastarasis palydovas perdavė į Žemę daug Jupiterio nuotraukų.

1975 m. įvyko pirmasis jungtinis JAV ir TSRS kosminis skrydis. Susijungus erdvėlaiviams „Sojuz" ir „Apolon", įgulos galėjo pereiti iš vieno erdvėlaivio į kitą.



11.13.4 pav.
Iš kairės į dešinę:
Nilas Oldenas Armstrongas,
Edvinas Oldrinas,
Maiklas Kolinzas

XX a. aštuntajame dešimtmetyje sukurtas daugkartinio naudojimo erdvėlaivis, kuris, kaip ir raketa, startuoja vertikaliai (11.13.7 pav., *a*), paleidžia dirbtinį palydovą arba aplanko orbitinę stotį, o paskui leidžiasi į Žemę kaip lėktuvas (11.13.7 pav., *b*).

Dabartiniu metu tik nedaugelis šalių savarankiškai gali sukurti nešančiąsias raketas. Jas kuria JAV, Rùsija, Kìnija, Japònija, Ìndija, Prancūzijà. Kosminiai aparatai tyrinėja Saulės sistemą. Numatomas pirmasis pilotuojamas skrydis į Marsą. Tačiau, planuojant tarpžvaigždinius skrydžius, iškyla tam tikrų kliūčių. Pirmoji – laikas. Jeigu pavyktų sukurti variklį, kuris kosminiam aparatui suteiktų greitį, artimą šviesos greičiui (300 000 km/s), kelionė į artimiausią žvaigždę – Kentauros Proksimą – užtruktų ilgiau kaip ketverius metus. Tokiu aparatu mūsų Galaktikos centrą būtų galima pasiekti tik po 30 000 metų.

Tarpžvaigždiniams skrydžiams reikia naujos kartos kosminių aparatų. Šiuo metu Saulės sistemai tirti naudojami aparatai, kuriems pradinį greitį suteikia nešančioji raketa. Vėliau jų varikliai įjungiami tik orbitai koreguoti. Tarpžvaigždiniams skrydžiams reikia kosminių aparatų, kurių varikliai veiktų visą laiką. Tačiau čia iškyla kuro gabenimo problema arba energijos gavyba iš kosmoso.

Tarpžvaigždiniams skrydžiams naudojami Saulės sistemos planetas tyrinėję aparatai. „Pioneer 10“, „Pioneer 11“, „Voyager 1“ ir „Voyager 2“ jau išskriejo iš Saulės sistemos ir leidosi į kelionę žvaigždžių link. Šie kosminiai aparatai gabena ir specialaus lydinio plokšteles su laiškais kitoms kosminėms civilizacijoms.



11.13.5 pav.



11.13.6 pav.

11.13.7 pav.



a



b

Skyriaus „Astronomija" apibendrinimas

Astronomija	Astronomija – mokslas, tiriantis dangaus kūnų ir jų sistemų kilmę, sandarą, judėjimą ir evoliuciją.
Pagrindinės astronomijos mokslo šakos	1. Astrometrija – astronomijos šaka, tirianti tiek regimąją, tiek tikrąją dangaus kūnų padėtį ir jos kitimą dangaus skliaute. 2. Astrofizika – astronomijos šaka, nagrinėjanti fizikinius ir cheminius procesus, vykstančius Saulės sistemos kūnuose, žvaigždėse, tarpžvaigždinėje medžiagoje. 3. Kosmologija – astrofizikos dalis, tirianti Visatos prigimtį, sandarą, kilmę ir raidą. 4. Dangaus mechanika – astronomijos šaka, tirianti gravitacijos jėgų veikiamų kosminių kūnų ir erdvėlaivių judėjimą.
Saulės sistema	Saulės sistemai priklauso: • Saulė, • Žemės grupės planetos (Merkurijus, Venera, Žemė, Marsas), • didžiosios planetos (Jupiteris, Saturnas, Uranas, Neptūnas), • nykštukinės planetos (Plutonas, Cerera, Eridė), • planetų palydovai, • mažieji dangaus kūnai (asteroidai, kometos, meteoroidai).
Žemė	Žemė – didžiausia Saulės sistemos Žemės grupės planeta. Žemės vidinė sandara: pluta, mantija, išorinis branduolys, vidinis branduolys. Mantija Pluta Išorinis branduolys Vidinis branduolys Žemės hidrosfera – trūkus vandens apvalkalas. Žemės atmosfera – oro sluoksnis, gaubiantis Žemę. Žemės biosfera – Žemės rutulio dalis, kurioje gyvena organizmai. Žemės magnetosfera – Žemę gaubianti erdvė, kurioje reiškiasi magnetinis laukas. Žemės forma – geoidas. Geoidu vadinama figūra, kuri gaunama sukant elipsę apie mažąją jos ašį.

Mėnulis	Mėnulis – vienintelis gamtinis Žemės palydovas ir artimiausias Žemei kosminis kūnas. Žvaigždinis (siderinis) mėnuo – laiko tarpas, per kurį Mėnulis apskrieja aplink Žemę žvaigždžių atžvilgiu. Jis lygus 27,3 Žemės paros. Sinodinis mėnuo – laiko tarpas, per kurį Mėnulis apskrieja aplink Žemę Saulės atžvilgiu. Jis lygus 29,5 Žemės paros. Sinodinis mėnuo – tai laiko tarpas tarp dviejų vienodų Mėnulio fazių. Mėnulio fazės: jaunatis, priešpilnis, pilnatis, delčia.
Asteroidai	Asteroidai yra netaisyklingos formos luistai, uolų skeveldros. Jie dar vadinami mažosiomis Saulės sistemos planetomis.
Kometos	Kometos – kintančios išvaizdos dangaus kūnai, sudaryti iš branduolio, skraistės ir uodegos. Kometos forma keičiasi kintant atstumui nuo Saulės.
Meteoroidai, meteorai, meteoritai	Meteoroidai – kosminėje erdvėje skriejantys maži kietieji kūnai: kometų liekanos, asteroidų nuolaužos. Meteoras – į Žemės atmosferą įlėkęs meteoroidas. Buityje meteorai vadinami krintančiomis žvaigždėmis. Meteoritai – Žemę pasiekę meteorai.
Astroblemos	Astroblemos – labai dideli meteoritų išmušti krateriai.
Žvaigždė	Didelės masės įkaitusios plazmos rutulys, sudarytas daugiausia iš vandenilio ir helio su nedidele sunkesniųjų cheminių elementų priemaiša, vadinamas žvaigžde.

Saulės sandara	Saulė sąlygiškai skaidoma į keturias sritis: • vidinę centrinę sritį, kurią sudaro branduolys, arba šerdis (nuo Saulės centro iki $\frac{1}{3}R$); • spindulinę zoną, kurioje energija plinta iš gilesnio sluoksnio į aukštesnį (nuo $\frac{1}{3}R$ iki $\frac{2}{3}R$); • konvekcijos zoną (nuo viršutinio spindulinės zonos krašto iki regimojo Saulės paviršiaus); • atmosferą (nutįstančią nuo konvekcijos zonos už regimojo Saulės disko ribų). Saulės atmosferą sudaro fotosfera, chromosfera ir vainikas. Vainikas; Protuberantas; Konvekcijos zona; Chromosfera; Spindulinė zona; Fotosfera; Termobranduolinių reakcijų zona; Saulės branduolys
Metinis žvaigždės paralaksas	Metiniu žvaigždės paralaksu vadinamas kampas, kuriuo iš žvaigždės būtų matomas didysis Žemės orbitos pusašis, statmenas regėjimo spinduliui. 2 žvaigždė; p; 1 žvaigždė; Žemė; Saulė
Parsekas	Parsekas (pc) – atstumas, iš kurio Žemės orbitos didysis pusašis, statmenas regėjimo spinduliui, matomas 1″ kampu.
Žvaigždės šviesis	Žvaigždės šviesiu L vadinamas jos šviesos stiprio ir Saulės šviesos stiprio santykis.

Žvaigždės absoliutusis ryškis	Žvaigždės absoliučiuoju ryškiu *M* vadinamas tas regimasis ryškis, kurį turėtų žvaigždė, jei būtų nutolusi nuo Žemės standartiniu atstumu (D_0 = 10 pc).
Dvinarės žvaigždės	Fizinę dvinarių žvaigždžių porą sudaro žvaigždžių dvejetai, besisukantys apie bendrą masės centrą.
Cefeidės	Cefeidės – žvaigždės, kurių šviesis periodiškai kinta, kintant spinduliuojamos šviesos stipriui.
Novos	Novos – žvaigždės, kurių šviesis per trumpą laiko tarpą padidėja dešimtis tūkstančių kartų, o paskui laipsniškai sumažėja iki pradinio.
Supernovos	Supernovos – žvaigždės, kurios sutviska ir užgęsta kaip ir novos, tačiau jų šviesio maksimumas būna šimtus kartų didesnis negu novų.
Pulsaras	Pulsaras – neutroninė žvaigždė, kuri sukdamasi spinduliuoja šviesos ir radijo bangų pluoštus.
Juodoji skylė	Juodoji skylė – nematoma erdvės sritis, kuriai būdinga labai stipri gravitacija.
Žvaigždynas	Žvaigždynu vadinama dangaus sritis su sąlygiškai pažymėtomis ribomis. Žvaigždynus dangaus skliaute randame mintyse sujungdami svarbiausias žvaigždes linijomis taip, kad išeitų kokia nors figūra. Žvaigždyno žvaigždės tarpusavyje nesusijusios. Tai tik regimoji jų projekcija dangaus skliaute.
Žvaigždės padėtį apibūdinantys dydžiai	• Deklinacija δ – šviesulio kampinis atstumas nuo dangaus pusiaujo. • Rektascensija α – kampas tarp dviejų apskritimų, kurių vienas išvestas per dangaus ašigalius *P* ir P_1 ir šviesulį *A*, o kitas – per dangaus ašigalius ir pavasario lygiadienio tašką.
Ekliptika	Regimasis Saulės kelias dangaus skliautu per metus vadinamas ekliptika.

Zodiako žvaigždynai	Žvaigždynai, per kuriuos eina ekliptika, vadinami Zodiako žvaigždynais, arba Zodiako juosta. Zodiako juostos žvaigždynai: Žuvys, Avinas, Tauras, Dvyniai, Vėžys, Liūtas, Mergelė, Svarstyklės, Skorpionas, Šaulys, Ožiaragis, Vandenis.
Galaktika	Galaktika – didžiulė gravitacijos susieta žvaigždžių, tarpžvaigždinių dujų ir dulkių ūkų sistema. Paukščių Takas – pagrindinė mūsų labai susiplojusios Galaktikos dalis.
Žvaigždžių spiečiai	Žvaigždžių spiečiai skirstomi į padrikuosius ir kamuolinius. • Padrikieji spiečiai sudaryti iš dešimčių arba šimtų mažai koncentruotų, daugiausia pagrindinės sekos žvaigždžių ir išsidėstę Galaktikos diske. • Kamuoliniai spiečiai sudaryti iš dešimčių arba šimtų tūkstančių koncentruotų pagrindinės sekos žvaigždžių ir raudonųjų milžinių, nykštukių. Patys tolimiausi kamuoliniai spiečiai yra ties Galaktikos riba.
Tarpžvaigždinė medžiaga	• Tarpžvaigždinė medžiaga – tai atomų, jonų, elektronų, molekulių dujos, dulkės, užpildančios tarpžvaigždinę erdvę. Apytiksliai 99 % tarpžvaigždinės medžiagos sudaro dujos, o apie 1 % – dulkės. • Tamsieji ūkai – tankūs tarpžvaigždinių dulkių ir dujų telkiniai, sugeriantys saulės šviesą. • Atspindžio ūkai – tarpžvaigždinių dulkių ir dujų debesys, atspindintys gretimų žvaigždžių šviesą. • Emisiniai ūkai – sužadinti, švytintys ūkai. • Planetiškieji ūkai – supernovų sprogimų metu nuo žvaigždžių atitrūkę išoriniai jų sluoksniai.
Galaktikų tipai	Pagal formą galaktikos skirstomos į spiralines, elipsines ir netaisyklingąsias. Taip pat yra aktyviųjų galaktikų.
Aktyviosios galaktikos	Galaktikos, kurios šalia žvaigždžių spinduliuojamos šiluminės energijos skleidžia nešiluminę energiją, vadinamos aktyviosiomis. Aktyviųjų galaktikų grupei priklauso: • radijo galaktikos – elipsinės galaktikos supermilžinės, spinduliuojančios radijo bangas; • radijo kvazarai – labai stipriai spinduliuojantys aktyviųjų galaktikų branduoliai.

Laboratoriniai darbai

Matavimo paklaidos

Matavimo paklaidų samprata

Atliekant fizikos laboratorinius darbus, tenka matuoti įvairius dydžius, paskui apdoroti matavimo rezultatus. Matavimą suprantame kaip fizikinio dydžio vertės gavimą bandymo metu naudojant matavimo priemones. Matavimas gali būti tiesióginis (kai fizikinio dydžio vertės nustatomos matavimo priemonėmis) arba netiesióginis (kai fizikinio dydžio vertės apskaičiuojamos pagal formules, siejančias tą dydį su kitais fizikiniais dydžiais, kurių vertės nustatomos matuojant tiesiogiai).

Matuojant fizikinius dydžius, neįmanoma gauti absoliučiai tikslaus rezultato. Netikslumų gali atsirasti dėl matavimo prietaisų netikslumo, dėl paties matavimo. Išmatuotos arba apskaičiuotos dydžio vertės nukrypimas nuo tiksliosios vertės vadinamas ***matãvimo pãklaida***. Pagal atsiradimo priežastis paklaidos skirstomos į dvi rūšis:

- *sistemingąsias pãklaidas*, atsirandančias dėl matavimo prietaisų netikslumo, netinkamų matavimo metodų;
- *atsitiktinès pãklaidas*, priklausančias nuo eksperimentuotojo įgūdžių, kruopštumo ir aplinkos poveikio (temperatūros, oro drėgnio ir pan.).

Matuodami labiau atsižvelgsime į sistemingąsias paklaidas.

Matavimo paklaidų skaičiavimas

Tarkime, X – matuojamas fizikinis dydis, X_{ap} – apytikslė to dydžio vertė, t. y. tiesiogiai arba netiesiogiai išmatuota vertė. Išmatuotos apytikslės vertės X_{ap} ir tiksliosios vertės X skirtumo modulis vadinamas ***absoliučiója matãvimo pãklaida***. Ji žymima ΔX.

Didžiausia absoliučioji tiesioginio matavimo paklaida lygi prietaiso absoliučiõsios paklaidõs $\Delta_{pr}X$ ir atskaitõs absoliučiõsios paklaidõs $\Delta_a X$ sumai:

$$\Delta X = \Delta_{pr}X + \Delta_a X.$$

Iš pradžių aptarkime, kaip skaičiuojama prietaiso absoliučioji paklaida. Ją lemia prietaiso konstrukcija (matavimo prietaisų paklaidas žr. 1 lentelėje).

1 lentelė

Eil. Nr.	Matavimo prietaisas	Matavimo riba	Padalos vertė	Absoliučioji prietaiso paklaida
1.	Liniuotė mokyklinė	iki 50 cm	1 mm	±1 mm
	braižomoji	iki 50 cm	1 mm	±0,2 mm
	instrumentinė (plieninė)	20 cm	1 mm	±0,1 mm
	demonstracinė	100 cm	1 cm	±0,5 cm
2.	Matavimo juosta	150 cm	0,5 cm	±0,5 cm
3.	Matavimo cilindras	iki 250 ml	1 ml	±1 ml
4.	Slankmatis	150 mm	0,1 mm	±0,05 mm
5.	Mikrometras	25 mm	0,01 mm	±0,005 mm
6.	Mokyklinis dinamometras	4 N	0,1 N	±0,05 N
7.	Mokomosios svarstyklės	200 g	–	±0,01 g
8.	Sekundmatis	0–30 min	0,2 s	±1 s per 30 min
9.	Barometras aneroidas	720–780 mm Hg	1 mm Hg	±3 mm Hg
10.	Laboratorinis termometras	0–100 °C	1 °C	±1 °C
11.	Mokyklinis ampermetras	2 A	0,1 A	±0,005 A
12.	Mokyklinis voltmetras	6 V	0,2 V	±0,15 V

Norint patiems apskaičiuoti prietaiso absoliučiąją paklaidą, reikia žinoti jo tikslumo klasę. Ji nurodoma prietaiso skalėje arba pase. Pagal tikslumą visi elektros prietaisai skirstomi į septynias klases: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Žinant prietaiso tikslumo klasę (γ_{pr}) ir visą jo skalę (X_{max}), galima rasti absoliučiąją paklaidą $\Delta_{pr}X$:

$$\Delta_{pr}X = \frac{\gamma_{pr}X_{max}}{100}.$$

Pavyzdžiui, jei ampermetro tikslumo klasė yra 4 ir juo galima išmatuoti 2 A srovės stiprį, tai ampermetro absoliučioji paklaida apskaičiuojama taip:

$$\Delta I_{pr} = 2\,\mathrm{A} \cdot \frac{4}{100} = 0{,}08\,\mathrm{A}.$$

Išsiaiškinkime, kaip skaičiuojama absoliučioji atskaitos paklaida $\Delta_a X$. Ji atsiranda matuojant, pavyzdžiui, netiksliai fiksuojant matavimo prietaisų rodmenis. ***Absoliučioji atskaitos paklaida lygi pusei smulkiausios prietaiso padalos vertės.*** Matuojant laiką, absoliučioji matavimo paklaida lygi sekundmačio arba laikrodžio padalos vertei, o matuojant masę svirtinėmis svarstyklėmis – mažiausio svarsčio, kuris neturi įtakos svarstyklių pusiausvyrai, masei.

Atsižvelgiant į absoliučiąją matavimo paklaidą, matavimo rezultatas užrašomas taip:

$$X = X_{ap} \pm \Delta X.$$

Absoliučioji matavimo paklaida paprastai apvalinama iki vieno reikšminio skaitmens ($\Delta X = 0{,}46 \approx \approx 0{,}5$); skaitinė matavimo rezultato vertė suapvalinama taip, kad paskutinis jos skaitmuo būtų tos pačios eilės kaip paklaidos skaitmuo ($X = 10{,}442 \approx 10{,}4$).

Santykinė paklaida ε lygi matuojamo dydžio absoliučiosios paklaidos ΔX ir to dydžio apytikslės vertės X_{ap} santykiui:

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X_{ap}} \cdot 100\ \%.$$

Santykinė paklaida rodo matavimo kokybę. Kuo mažesnė santykinė paklaida, tuo tikslesnis matavimas.

Matuojant netiesiogiai, patariama pirmiausia apskaičiuoti santykinę paklaidą. Tai atliekama tokia tvarka. Iš pradžių apskaičiuojamos tiesiogiai matuojamų dydžių absoliučiosios paklaidos, paskui netiesiogiai matuojamo dydžio santykinė paklaida, kuri lygi visų matuojamų dydžių santykinių paklaidų sumai. Pavyzdžiui, jei netiesiogiai matuojamas fizikinis dydis X apskaičiuojamas pagal formulę

$$X = \frac{A}{B},$$

tai santykinė paklaida

$$\varepsilon_X = \varepsilon_A + \varepsilon_B = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}.$$

Galiausiai randama netiesiogiai matuojamo dydžio absoliučioji paklaida

$$\Delta X = X_{ap} \varepsilon_X.$$

Aptarėme pavyzdį, kaip apskaičiuojama netiesioginio matavimo paklaida, kai fizikinis dydis išreiškiamas dviejų fizikinių dydžių santykiu. Tačiau netiesiogiai matuojami fizikiniai dydžiai gali būti išreikšti ir sudėtingesnėmis formulėmis. Kaip apskaičiuojamos santykinės paklaidos kai kuriais kitais atvejais, rodo 2 lentelė.

2 lentelė

Eil. Nr.	Fizikinio dydžio formulė	Santykinės paklaidos formulė
1.	$A = BCD$	$\varepsilon = \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta D}{D}$
2.	$A = \frac{B}{CD}$	
3.	$A = B + C$	$\varepsilon = \frac{\Delta B + \Delta C}{B + C}$
4.	$A = B\sqrt{\frac{C}{D}}$	$\varepsilon = \frac{\Delta B}{B} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta C}{C} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta D}{D}$

Kiekviename laboratorinių darbų apraše, kuris pateikiamas vadovėlyje, paaiškinta, kaip reikia apskaičiuoti netiesioginio matavimo santykinę paklaidą. Matuojant fizikinius dydžius, galutinio rezultato santykinė paklaida turi būti ne didesnė kaip 5 %. Jeigu ji viršija 10 %, siūloma matuoti dar kartą.

Laboratorinio darbo aprašymas

Aprašant atliktą laboratorinį darbą, siūloma laikytis tokio nuoseklumo:

1. Laboratorinio darbo numeris.
2. Darbo pavadinimas.
3. Darbo tikslas.
4. Darbo priemonės.
5. Praktinio darbo turinys:
   - darbo aprašymas;
   - brėžinys (jeigu reikalingas);
   - ieškomų dydžių ir jų paklaidų formulės;
   - matavimo duomenų lentelės.
6. Galutinis rezultatas, išvada ir kt. (atsižvelgiant į darbo tikslą).

5 laboratorinis darbas.
Stiklo lūžio rodiklio nustatymas

Darbo tikslas: bandymais nustatyti stiklo lūžio rodiklį.

Teorinis darbo pagrindimas. Šviesai pereinant iš vienos terpės į kitą, pasikeičia jos sklidimo kryptis. Šviesos spindulio krypties pasikeitimas, kai jis pereina iš vienos skaidrios terpės į kitą, vadinamas šviesos lūžimu. Jį apibūdina šviesos lūžimo dėsnis: krintantysis spindulys, lūžęs spindulys ir per kritimo tašką nubrėžtas statmuo terpes skiriančiam paviršiui yra vienoje plokštumoje; kritimo kampo sinuso ir lūžio kampo sinuso santykis dviem terpėms yra pastovus dydis. Tas dydis n vadinamas lūžio rodikliu:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n. \qquad (1)$$

Darbo priemonės: 1) gretasienė stiklinė plokštelė; 2) popieriaus lapas; 3) keletas smeigtukų; 4) matlankis; 5) pieštukas.

Darbo eiga

1. Ant popieriaus lapo padėkite stiklinę plokštelę ir apibrėžkite ją pieštuku.

2. Vienoje plokštelės pusėje įsmeikite du smeigtukus taip, kad juos jungianti tiesė sudarytų su plokštelės paviršiumi tam tikrą kampą (1 pav.). Smeigtukų vietas pažymėkite taškais A ir B.

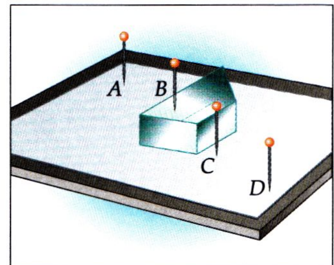
3. Dar du smeigtukus įsmeikite kitoje plokštelės pusėje taip, kad, žiūrint pro apatinę plokštelės sienelę, visi keturi smeigtukai atrodytų esantys vienoje tiesėje. Pažymėkite šių dviejų smeigtukų vietą taškais C ir D.

4. Nuimkite plokštelę ir nubrėžkite spindulio sklidimo kelią, kurį žymi taškai A, B, C ir D (2 pav.).

5. Per spindulio AB kritimo tašką O nubrėžkite statmenį MN plokštelės sienelėms (2 pav.). Pažymėkite spindulio kritimo kampą α ir lūžio kampą γ.

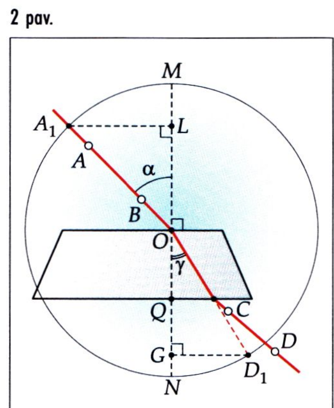
6. Matlankiu išmatuokite šviesos kritimo ir lūžio kampus, paskui pagal 1 formulę apskaičiuokite stiklo lūžio rodiklį.

7. Tašką O laikydami centru, nubrėžkite apskritimą ir atkarpas A_1L ir D_1G.



1 pav.

2 pav.



8. Stiklo lūžio rodiklį apskaičiuokite pagal formulę

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{\left|\frac{A_1L}{OA_1}\right|}{\left|\frac{GD_1}{OD_1}\right|} = \frac{|A_1L|}{|GD_1|}. \qquad (2)$$

9. Apskaičiuokite matavimo paklaidas:

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta A_1L}{A_1L} + \frac{\Delta GD_1}{GD_1};$$

$$\Delta n = n\varepsilon_n.$$

10. Užrašykite galutinį rezultatą:

$$n = n_{ap} \pm \Delta n.$$

Klausimai ir užduotys ??

1. Remdamiesi bangos fronto sąvoka, paaiškinkite, kodėl šviesa, pereidama iš vienos skaidrios terpės į kitą, pakeičia sklidimo kryptį.

2. Apskaičiuokite šviesos greitį naudotoje stiklinėje plokštelėje.

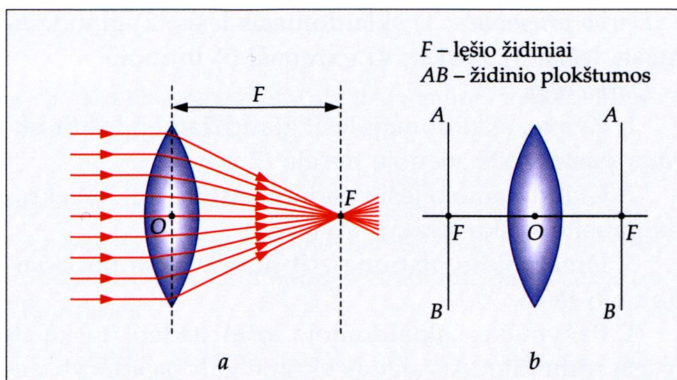
3. Sakoma, kad tamsiausia būna prieš aušrą. Paaiškinkite, kodėl pirma pradeda aušti, o tik paskui pateka saulė.

4. Valydamas ežerą, naras žvilgtelėjo į vandens paviršių ir pastebėjo, kad saulės spinduliai į jį krinta 60° kampu. Apskaičiuokite, kokiu kampu tuo metu Saulė buvo pakilusi virš horizonto. (30°)

6 laboratorinis darbas. Atvaizdų gavimas lęšiu. Sklaidomojo lęšio židinio nuotolio ir laužiamosios gebos nustatymas

Darbo tikslas: bandymu nustatyti sklaidomojo lęšio židinio nuotolį ir laužiamąją gebą.

Teorinis darbo pagrindimas. Jeigu lygiagrečiai su pagrindine optine ašimi sklindantį pluoštą nukreipsime į glaudžiamąjį lęšį, tai už lęšio jis susirinks viename taške (1 pav.). Taškas, kuriame už glaudžiamojo lęšio



1 pav.

susirenka lygiagrečiai su pagrindine optine ašimi sklidę spinduliai, vadinamas pagrindiniu židiniu. Jis žymimas raide *F*. Lęšis turi du pagrindinius židinius. Glaudžiamojo lęšio pagrindinis židinys yra tikrasis, nes jame susirenka patys spinduliai. Sklaidomojo lęšio pagrindinis židinys yra menamasis, mat jame susikerta už lęšio sklindančių spindulių tęsiniai.

Atstumas *OF* nuo lęšio optinio centro iki pagrindinio židinio vadinamas lęšio židinio nuotoliu. Jis žymimas ta pačia raide *F* kaip ir židinio nuotolis. Lęšio židinio nuotolis apskaičiuojamas pagal plonojo lęšio formulę

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{d}+\frac{1}{f}. \quad (1)$$

Iš jos išreikškime židinio nuotolį:

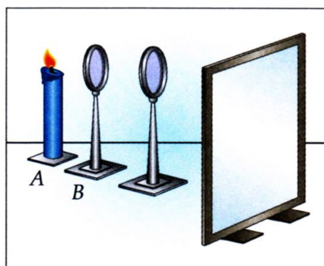
$$F=\frac{fd}{f+d}. \quad (2)$$

Kadangi lęšio židinys, kaip ir gaunamas atvaizdas, yra menamasis, tai

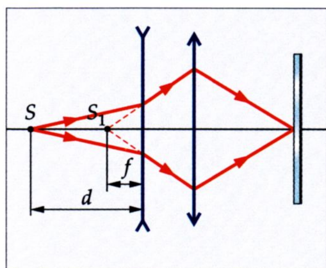
$$F=\frac{fd}{d-f}. \quad (3)$$

Nuo lęšio židinio nuotolio priklauso lęšio gebėjimas laužti spindulius. Minėtą lęšio savybę apibūdina fizikinis dydis, vadinamas lęšio laužiamąja geba. Tas dydis yra atvirkščias lęšio židinio nuotoliui ir žymimas raide *D*:

$$D=\frac{1}{F}. \quad (4)$$



2 pav.



3 pav.

Darbo priemonės: 1) sklaidomasis lęšis; 2) glaudžiamasis lęšis; 3) žvakė[1]; 4) ekranas; 5) liniuotė.

Darbo eiga

1. Žvakę, sklaidomąjį lęšį, glaudžiamąjį lęšį ir ekraną pastatykite vienoje tiesėje (2 pav.).

2. Glaudžiamojo lęšio padėtį keiskite tol, kol ekrane gausite ryškų žvakės atvaizdą.

3. Išmatuokite atstumą *AB* nuo žvakės iki sklaidomojo lęšio.

4. Pažymėkite sklaidomojo lęšio padėtį (tašką *B*) ir lęšį nuimkite. Atvaizdas ekrane gali pasidaryti neryškus arba ir visai išnykti.

5. Artinkite žvakę prie glaudžiamojo lęšio, kol atvaizdas ekrane vėl bus ryškus. Tada žvakė bus toje vietoje, kur sklaidomasis lęšis sudarė atvaizdą S_1 (3 pav.).

6. Išmatuokite atstumą nuo žvakės naujos padėties iki taško *B*. Šis atstumas yra menamojo atvaizdo nuotolis f iki lęšio.

7. Apskaičiuokite sklaidomojo lęšio židinio nuotolį:

$$F = \frac{fd}{d - f}.$$

8. Apskaičiuokite šio lęšio laužiamąją gebą:

$$D = \frac{1}{F}.$$

9. Apskaičiuokite židinio nuotolio santykinę paklaidą:

$$\varepsilon_F = \frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta(d + f)}{d - f}.$$

10. Apskaičiuokite židinio nuotolio absoliučiąją paklaidą:

$$\Delta F = F \cdot \varepsilon_F.$$

11. Užrašykite galutinį matavimo rezultatą:

$$F = F_{ap} \pm \Delta F.$$

$$\varepsilon = \ldots \%.$$

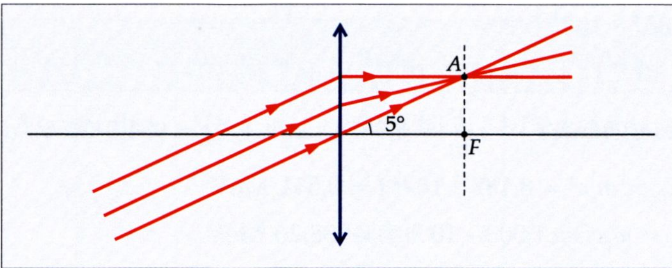
[1] Vietoj žvakės gali būti įtaisyta lemputė su gaubteliu. Tada laboratoriniam darbui dar reikės papildomų priemonių: srovės šaltinio, jungiklio ir jungiamųjų laidų.

Klausimai ir užduotys

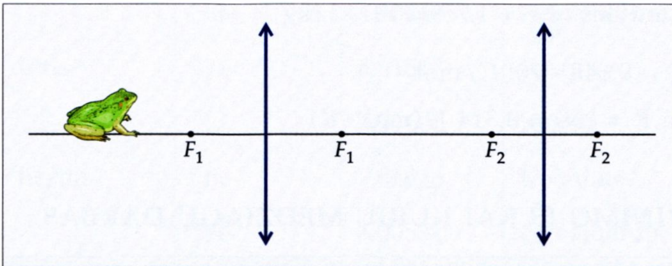
1. Ar menamąjį daikto atvaizdą galima matyti ekrane? Atsakymą pagrįskite.

2. Lygiagretusis spindulių pluoštas krinta į lęšį, sudarydamas su pagrindine optine ašimi 5° kampą (4 pav.). Apskaičiuokite lęšio židinio nuotolį, žinodami, kad spinduliai susikerta atstumu $AF = 20$ cm nuo pagrindinės optinės ašies. (2,74 m)

3. Optinę sistemą sudaro du glaudžiamieji lęšiai (5 pav.). Braižydami gaukite varlės atvaizdą, kurį sukuria ši lęšių sistema.



4 pav.



5 pav.

Priedai

1. PAGRINDINĖS KONSTANTOS IR JŲ IŠVESTINIAI DYDŽIAI

Elementarusis elektros krūvis $e = 1{,}60219 \cdot 10^{-19}$ C

Elektrono rimties masė $m_e = 9{,}1095 \cdot 10^{-31}$ kg $= 5{,}486 \cdot 10^{-4}$ u

Protono rimties masė $m_p = 1{,}6726 \cdot 10^{-27}$ kg $= 1{,}00728$ u

Neutrono rimties masė $m_n = 1{,}6749 \cdot 10^{-27}$ kg $= 1{,}00866$ u

Šviesos greitis vakuume $c = 2{,}9979 \cdot 10^{8}$ m/s

Gravitacijos konstanta $G = 6{,}672 \cdot 10^{-11}$ N · m²/kg²

Elektrinė konstanta $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ F/m

Avogadro skaičius $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ mol⁻¹

Bolcmano konstanta $k = 1{,}3807 \cdot 10^{-23}$ J/K

Planko konstanta $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J · s $= 4{,}136 \cdot 10^{-15}$ eV · s

Masės ir energijos sąryšio koeficientas $c^2 = \frac{E}{m} = 8{,}9874 \cdot 10^{16}$ J/kg $= 931{,}5$ MeV/u

Elektrono rimties energija $E_{0e} = m_e c^2 = 8{,}187 \cdot 10^{-14}$ J $= 0{,}511$ MeV

Protono rimties energija $E_{0p} = m_p c^2 = 1{,}503 \cdot 10^{-10}$ J $= 938{,}26$ MeV

Neutrono rimties energija $E_{0n} = m_n c^2 = 1{,}505 \cdot 10^{-10}$ J $= 939{,}55$ MeV

Elektrono krūvio ir masės santykis $\frac{e}{m_e} = 1{,}759 \cdot 10^{11}$ C/kg

Faradėjaus skaičius $F = eN_A = 9{,}648 \cdot 10^{4}$ C/mol

Universalioji dujų konstanta $R = kN_A = 8{,}314$ J/(mol · K)

2. ELEKTRONO IŠLAISVINIMO IŠ KAI KURIŲ MEDŽIAGŲ DARBAS

Medžiaga	***A*, eV**	**Medžiaga**	***A*, eV**
Bario oksidas	1,0	Nikelis	4,84
Cezis	1,9	Platina	5,3
Cinkas	3,74	Sidabras	4,3
Kadmis	4,08	Varis	4,5
Kalis	2,2	Volframas	4,5
Litis	2,4		

3. KAI KURIŲ MEDŽIAGŲ LŪŽIO RODIKLIS

Medžiaga	***n***	**Medžiaga**	***n***
Akmens druska	1,54	Kedrų aliejus	1,52
Anglies disulfatas	1,63	Kvarcas	1,54
Cukrus	1,56	Ledas	1,31
Deimantas	2,4	Oras	1,00029
Etilo alkoholis	1,36	Stiklas	1,6
Glicerolis	1,47	Vanduo	1,33

4. KAI KURIŲ ELEMENTŲ IZOTOPŲ SANTYKINĖ ATOMINĖ MASĖ

Elementas	**Izotopas**	**Masė, u**	**Elementas**	**Izotopas**	**Masė, u**
Vandenilis	${}^{1}_{1}H$	1,00783	Deguonis	${}^{16}_{8}O$	15,99491
	${}^{2}_{1}H$	2,01410		${}^{17}_{8}O$	16,99913
	${}^{3}_{1}H$	3,01605	Fluoras	${}^{19}_{9}F$	18,99843
Helis	${}^{3}_{2}He$	3,01603	Neonas	${}^{20}_{10}Ne$	19,99244
	${}^{4}_{2}He$	4,00260	Aliuminis	${}^{27}_{13}Al$	26,98153
Litis	${}^{6}_{3}Li$	6,01513	Fosforas	${}^{30}_{15}P$	29,97867
	${}^{7}_{3}Li$	7,01601	Kalcis	${}^{40}_{20}Ca$	39,97542
Berilis	${}^{7}_{4}Be$	7,01916	Kobaltas	${}^{56}_{27}Co$	55,95769
	${}^{8}_{4}Be$	8,00531	Gyvsidabris	${}^{200}_{80}Hg$	200,02800
	${}^{9}_{4}Be$	9,01505	Radonas	${}^{222}_{86}Rn$	222,01922
Boras	${}^{10}_{5}B$	10,01294	Radis	${}^{226}_{88}Ra$	226,02435
	${}^{11}_{5}B$	11,00930	Uranas	${}^{235}_{92}U$	235,04299
Anglis	${}^{12}_{6}C$	12,00000		${}^{238}_{92}U$	238,05006
	${}^{13}_{6}C$	13,00335		${}^{239}_{92}U$	239,05122
Azotas	${}^{14}_{7}N$	14,00307	Plutonis	${}^{239}_{94}Pu$	239,05122

5. ELEMENTARIOSIOS DALELĖS

Klasė		Dalelės pavadinimas	Jos žymuo	Savybės								Masė, GeV/c^2	Gyvavimo trukmė, s
				Dalelės				Antidalelės					
				Q	*B*	*S*	Kvarkų sudėtis	*Q*	*B*	*S*	Kvarkų sudėtis		
HADRONAI	Barionai	Protonas	p	+1	1	0	$\bar{u}\ \bar{u}\ \bar{d}$	−1	−1	0	$\bar{u}\ \bar{u}\ \bar{d}$	0,983	Stabilus
		Neutronas	n	0	1	0	$\bar{u}\ \bar{d}\ \bar{d}$	0	−1	0	$\bar{u}\ \bar{d}\ \bar{d}$	0,940	900
		Lambda	Λ	0	1	−1	$\bar{u}\ \bar{d}\ \bar{s}$	0	−1	+1	$\bar{u}\ \bar{d}\ \bar{s}$	1,115	$2,6 \cdot 10^{-10}$
		Sigma plius	Σ^+	+1	1	−1	$\bar{u}\ \bar{u}\ \bar{s}$	−1	−1	+1	$\bar{u}\ \bar{u}\ \bar{s}$	1,189	$0,8 \cdot 10^{-10}$
		Sigma minus	Σ^-	−1	1	−1	$\bar{d}\ \bar{d}\ \bar{s}$	1	−1	+1	$\bar{d}\ \bar{d}\ \bar{s}$	1,197	$1,5 \cdot 10^{-10}$
		Sigma nulis	Σ^0	0	1	−1	$\bar{u}\ \bar{d}\ \bar{s}$	0	−1	+1	$\bar{u}\ \bar{d}\ \bar{s}$	1,192	$6 \cdot 10^{-20}$
		Chi minus	Ξ^-	−1	1	−2	$\bar{d}\ \bar{s}\ \bar{s}$	+1	−1	+2	$\bar{d}\ \bar{s}\ \bar{s}$	1,321	$1,6 \cdot 10^{-10}$
		Chi nulis	Ξ^0	0	1	−2	$\bar{u}\ \bar{s}\ \bar{s}$	0	−1	+2	$\bar{u}\ \bar{s}\ \bar{s}$	1,315	$3 \cdot 10^{-10}$
		Omega minus	Ω^-	−1	1	−3	$\bar{s}\ \bar{s}\ \bar{s}$	+1	−1	+3	$\bar{s}\ \bar{s}\ \bar{s}$	1,672	$0,8 \cdot 10^{-10}$
		Lambda žavusis	Λ_c	1	1	0	$\bar{u}\ \bar{d}\ \bar{c}$	−1	−1	0	$\bar{u}\ \bar{d}\ \bar{c}$	2,28	$2 \cdot 10^{-13}$
	Mezonai	Pi nulis	π^0	0	0	0	$u\ \bar{u}$ ar $d\ \bar{d}$	0	0	0	$\bar{u}\ u$ ar $\bar{d}\ d$	0,135	$0,8 \cdot 10^{-16}$
		Pionai	π^+, π^-	+1	0	0	$u\ \bar{d}$	−1	0	0	$\bar{u}\ d$	0,140	$2,8 \cdot 10^{-8}$
		K nulis	K^0	0	0	+1	$d\ \bar{s}$	0	0	−1	$\bar{d}\ s$	0,498	$5 \cdot 10^{-8}$, $1 \cdot 10^{-10}$
		Kaonai	K^+, K^-	+1	0	+1	$u\ \bar{s}$	−1	0	−1	$\bar{u}\ s$	0,494	$1,2 \cdot 10^{-8}$
		J/Psi	J/Ψ	0	0	0	$c\ \bar{c}$	0	0	0	$\bar{c}\ c$	3,1	10^{-20}
		D nulis	D^0	0	0	0	$c\ \bar{u}$	0	0	0	$\bar{c}\ u$	1,87	10^{-17}
		D plius	D^+	+1	0	0	$c\ \bar{d}$	0	0	0	$\bar{c}\ d$	1,87	$4 \cdot 10^{-13}$
		Upsilon	Y	0	0	0	$b\ \bar{b}$	0	0	0	$\bar{b}\ b$	9,46	10^{-20}

Tęsinys

Klasė	Dalelės pavadinimas	Jos žymuo	Savybės								Masė, GeV/c^2	Gyvavimo trukmė, s
			Dalelės				Antidalelės					
			Q	*B*	*S*	Kvarkų sudėtis	*Q*	*B*	*S*	Kvarkų sudėtis		
LEPTONAI	Elektronas, pozitronas	e^-, e^+	–1	0	0	–	+1	0	0	–	0,00051	Stabilus
	Miuonai	μ^+, μ^-	–1	0	0	–	+1	0	0	–	0,1056	$2 \cdot 10^{-6}$
	Sunkusis tau leptonas	τ	–1	0	0	–	+1	0	0	–	1,784	$3 \cdot 10^{-13}$
	Elektroninis neutrinas	ν_e	0	0	0	–	0	0	0	–	< 50 eV?	Stabilus?
	Miuoninis neutrinas	ν_μ	0	0	0	–	0	0	0	–	< 0,5 MeV?	Stabilus?
	Tau neutrinas	ν_τ	0	0	0	–	0	0	0	–	< 70 MeV?	Stabilus?
KALIBRA-CINIAI BOZONAI	Fotonas	γ	**Krūvis**		0						0	Stabilus
	W	W^+, W^-			+1, –1						83	10^{-25}
	Z	Z			0						93	10^{-25}
	Gliuonas	g			0						0	Stabilus
KVARKAI	Kylantysis	u	**Krūvis**		+2/3		**Barionų skaičius**		+1/3		≈ 0,005	
	Krintantysis	d			–1/3				+1/3		≈ 0,01	
	Keistasis	s			–1/3				+1/3		≈ 0,1	
	Žavusis	c			+2/3				+1/3		≈ 1,5	
	Gelminis	b			–1/3				+1/3		≈ 4,7	
	Viršūninis	t			+2/3				+1/3		≈ 175	

6. SAULĖS SISTEMOS PLANETŲ DUOMENYS

Planetos pavadinimas	Nuotolis nuo Saulės, mln. km		Skriejimo aplink Saulę periodas	Sukimosi apie ašį periodas	Orbitos posvyris į ekliptiką	Didžiausias spindesio ryškis	Skersmens ilgis, km		Masė, $\times 10^{24}$ kg	Tankis, g/cm^3	Laisvojo kritimo pagreitis, m/s^2	Turi palydovų
	didžiausias	mažiausias					pusiaujo	ašigalinis				
Merkurijus	69,8	46,0	87,97 d.	58,78 d.	7°	–1,9	4880	4880	0,330	5,43	3,70	0
Venera	108,9	107,5	224,70 d.	243,69 d.	3,4°	–4,6	12 104	12 104	4,869	5,24	8,87	0
Žemė	152,1	147,1	365,26 d.	23,93 h	0°	–3,9	12 756	12 714	5,974	5,52	9,78	1
Marsas	249,2	206,6	1,88 m.	24,62 h	1,8°	–2,0	6794	6750	0,642	3,93	3,69	2
Jupiteris	816,6	740,5	11,86 m.	9,92 h	1,3°	–2,7	142 984	133 708	1899	1,33	23,12	63
Saturnas	1514,5	1352,5	29,46 m.	10,66 h	2,5°	–0,3	120 536	108 728	568,5	0,69	8,96	56
Uranas	3003,6	3741,3	84,01 m.	17,24 h	0,8°	5,5	51 118	49 946	86,83	1,27	8,69	27
Neptūnas	4545,7	4444,4	164,79 m.	16,11 h	1,8°	7,8	49 528	48 682	102,4	1,64	11,0	13
Plutonas	7304,3	4435,0	247,68 m.	6,4 d.	17,2°	13,7	2390	2390	0,0125	1,75	0,58	3

7. KAI KURIŲ RYŠKIAUSIŲ ŽVAIGŽDŽIŲ DUOMENYS

Žvaigždė	Regimasis ryškis	Rektasensija α	Deklinacija δ	Spektrinė klasė[2]	Temperatūra, 10^3 K	Atstumas, pc
Tauro α	1,06	$4^h33,0^m$	+16°25′	K	3,5	20,8
Septynių Šienpjovių β	0,34	$5^h12,1^m$	–8°15′	B	12,8	330
Vežėjo α	0,21	$5^h13,0^m$	+45°57′	G	5,2	13,7
Septynių Šienpjovių α	0,92[1]	$5^h52,5^m$	+7°24′	M	3,1	200
Didžiojo Šuns α	–1,58	$6^h42,9^m$	–16°39′	A	16,8	2,7
Dvynių α	1,99	$7^h31,4^m$	+32°00′	A	10,4	13
Mažojo Šuns α	0,48	$7^h36,7^m$	+5°21′	F	6,9	3,5
Dvynių β	1,21	$7^h42,3^m$	+28°09′	K	4,6	10,7
Liūto α	1,34	$10^h0,57^m$	+12°13′	A	13,2	25,6
Mergelės α	1,21	$13^h22,6^m$	–10°54′	B	16,8	47,7
Jaučiaganio α	0,24	$14^h13,4^m$	+19°27′	K	4,1	11,1
Skorpiono α	1,22[1]	$16^h26,3^m$	–26°19′	M	5,1	52,5
Lyros α	0,14	$18^h35,2^m$	+38°41′	A	10,6	8,1
Erelio α	0,89	$19^h48,3^m$	+8°44′	F	8,4	5,0
Gulbės α	1,33	$20^h39,7^m$	+45°06′	A	9,8	290
Pietų Žuvies α	1,28	$22^h54,9^m$	–29°53′	A	9,8	7,0

[1] Regimasis ryškis šiek tiek kinta.
[2] Spektrinė klasė nurodoma apytiksliai.

Naudota literatūra

Ažusienis A., Pučinskas A., Straižys V. Astronomija. Vilnius, 2003.
Butrimaitė J., Dementjev A., Gadonas R. ir kt. Fizika. II dalis. Vilnius, 2004.
Charlot R., Cros A., Walter C. Fondaments de la physique 2e CT. Paris, 1978.
Dindorf W. Fizika i astronomija. Moja fizika. Warszawa, 2002.
Dobson K., Grace D., Lovett D. Fizika. 2 dalis. Vilnius, 2002.
Fisica Y Quimica 3 eso / *Baeza D., Delgado A. M., Galindo E.* Barselona, 1995.
Fizika i astronomija 7 / *Pinskij A. A., Razumovskij V. G., Dik J. I.* i dr. Moskva, 1998.
Fizika: Školnij kurs / *Orlov V. A., Nikiforov G. G.* i dr. Moskva, 2000.
Focus op de fysica / *Clippelier K. D., Frans K., Hofkens J.* België, 1991.
Gamtos mokslai / *Lale H., Daniel A., Duke M.* Vilnius, 1997.
Garcia T., Ebede E. Fisica eso 4 2n. Barselona, 1998.
Herbert A., Bodin J. Sciences physiques 21. Paris, 1989.
Kabardinas O. Fizika: Informacinė medžiaga. Kaunas, 1998.
Karazija R. Fizika humanitarams. II dalis. Šiuolaikinė fizika. Vilnius, 1997.
Karazija R. Fizikos istorija. Vilnius, 2002.
Kasjanov V. Fizika 10. Moskva, 2002.
Miakiševas G., Buchovcevas B. Fizika: Vadovėlis XII klasei. Kaunas, 1993.
Pfysicue chimie 2de / *Bouland A., Caurvet J., Fay J.* Paris, 1997.
Physik 9/10: Natur und Technik / *Heepmann B., Kunze W., Muckenfuss H.* u. a. Berlin, 1992.
Rymkevičius A. Fizikos uždavinynas IX–XII klasei. Kaunas, 1993.
Šalna V. A. Optika. Vilnius, 2004.
Tarasonis V. Fizika. III dalis: Vadovėlis 12 klasei. Vilnius, 1998.
Vičas S. Fizikos uždavinynas XI–XII klasei. Kaunas, 2000.

Panaudotų iliustracijų šaltiniai

Viršelio nuotraukos

http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail/nasaNAS~20~20~120309~227008:Brahms-Crater / NASA

http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail/NVA2~8~8~13493~114034:Hubble-Photographs—Double-Bubble—?printerFriendly=1 / NASA [http://www.nasa.gov /] and The Hubble Heritage [http://heritage.stsci.edu] Team (STScI [http://www.stsci.edu/]/ AURA [http://www.aura-astronomy.org/]

http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail/NVA2~1~1~2286~102443_/NASA Cassini-Huygens Collection

http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail/nasaNAS~5~5~21709~126461:Schmitt-Next-to-Big-Boulder / NASA Eugene A. Cernan

http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail/nasaNAS~20~20~120742~227444 /The-Face-of-Phoebe – NASA/JPL/Space Science Institute

http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail/nasaNAS~5~5~23911~127531:Backpacking / NASA / GPN-2000-001156

http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail/NVA2~1~1~2283~102437 / NASA Cassini-Huygens Collection

http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail/nasaNAS~9~9~60855~164702 / NASA Marshall Space Flight Center Collection

http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail nasaNAS~20~20~120502~227204:Clementine-Observes-the-Moon,-Solar / NASA

http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail/nasaNAS~12~12~64217~168637: Out-of-the-Dust,-A-Planet-is-Born / NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC)

Skyrių nuotraukos

Iš viršaus į apačią, iš kairės į dešinę.

7 skyrius (p. 6–7)

www.shutterstock.com Image ID: 1854585 © Stephen Firmender

© European Southern Observatory (ESO) / ESO Paranal Observatory Image Gallery

www.shutterstock.com Image ID: 26371885 © Aptyp_koK

www.shutterstock.com Image ID: 28909489 © Vladimir Sazonov

© Michael Kobusch / NASA/courtesy of nasaimages.org

STScI / NASA / courtesy of nasaimages.org

www.shutterstock.com Image ID: 22312042 © Jim Barber

www.shutterstock.com Image ID: 10266031 © Vasyl Dudenko

8 skyrius (p. 62–63)

Ulf Seifert nuotrauka / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Newton_rings.jpg

Shuster, Arthur and Arthur E. Shipley. *Britain's Heritage of Science.* London: Constable & Co. Ltd., 1917 / http://www.marcdatabase.com/~lemur/lemur.com/gallery-of-antiquarian-technology/worthies/

www.shutterstock.com Image ID: 3437768 © pansy

Scott Bauer nuotrauka / United States Department of Agriculture http://www.ars.usda.gov/is/graphics/photos/k7245-1.htm

Astrolab / http://astro-canada.ca/_en/photo690.php?a4313_michelson1

Nevit Dilmen nuotrauka / pagal GFDL ir Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0 licenciją / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plastic_Protractor_Polarized_05375.jpg

9 skyrius (p. 112–113)

www.shutterstock.com Image ID: 16544965 © EugeneF

Professor Einstein's Visit to the United States", The Scientific Monthly 12:5 (1921), p. 483 / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert_Einstein_photo_1921.jpg

www.shutterstock.com Image ID: 3969205 © Otmar Smit

Library of Congress. Motion Picture, Broadcasting and Recorded Sound Division. Washington, D. C. 20540 USA / ID berlp 12030108 / http://memory.loc.gov/cgi-bin/query

www.shutterstock.com Image ID: 35123302 © Dgrilla

Digital Vision by Getty Images

10 skyrius (p. 144–145)

© CERN / CERN-AC-8510776

Eric Findlay nuotrauka / pagal Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0 licenciją / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Otto_Hahn_portrait.jpg

© CERN / CERN-EX-0809005 01 / CMS Collaboration

Library of Congress's Prints and Photographs Division / LC-USZ62-102506 / http://hdl.loc.gov/loc.pnp/cph.3c02506

© CERN / CERN-AC-9402027

© Tim Wright/CORBIS

Eigenes Werk nuotrauka / pagal GFDL ir Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0 licenciją / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gundremmingen_Nuclear_Power_Plant.jpg

©Andrius Ufartas / UAB „Baltijos fotografijos linija" / www.fotobankas.lt

11 skyrius (p. 224–225)

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planispherical_astrolabe_mg_7095.jpg / Wikimedia Commons naudotojas Rama / pagal CeCILL licenciją

Luc Viatour / www.lucnix.be

SOHO (ESA & NASA)

NASA Apollo / Johnson Space Center / AS10-32-4823

E. Kolmhofer, H. Raab; Johannes-Kepler-Observatory, Linz, Austria (http://www.sternwarte.at) / pagal GFDL ir Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0 licenciją / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comet_Hale-Bopp_1995O1.jpg

Casey Reed / NASA

Royal Swedish Academy of Sciences / http://www.solarphysics.kva.se/NatureNov2002/

© European Southern Observatory (ESO) / http://www.eso.org/gallery/v/ESOPIA/Stars/phot-02a-01.tif.html

Nuotraukos prie teksto

7.1.1 pav. www.shutterstock.com Image ID: 10266031 © Vasyl Dudenko
7.1.7 b pav. © Michael Kobusch / NASA/courtesy of nasaimages.org
7.1.7 c pav. www.shutterstock.com Image ID: 26371885 © Aptyp_koK
7.3.2 a pav. www.shutterstock.com Image ID: 22481746 © Orange Line Media
7.3.2 b pav. Elvio Zovės nuotrauka
7.4.3 pav. www.shutterstock.com Image ID: 22312042 © Jim Barber
7.4.5 pav. www.shutterstock.com Image ID: 10669171 © Tatjana Strelkova
7.4.6 pav. www.shutterstock.com Image ID: 6126805 © James Steidl
7.4.7 pav. Milos Zinkovos nuotrauka / http://en.wikipedia.org/wiki/File:Desertmirage.jpg
7.8.4 pav. www.shutterstock.com Image ID: 27916246 © Reeed
7.8.5 pav. www.istockphoto.com File #: 8557303
7.9.7 pav. www.shutterstock.com Image ID: 28909489 © Vladimir Sazonov
7.9.8 pav. www.shutterstock.com Image ID: 18327784 © Mircea BEZERGHEANU
7.10.2 pav. www.shutterstock.com Image ID: 1534670 © Thomas Mounsey
7.11.1 pav. www.shutterstock.com Image ID: 1854585 © Stephen Firmender
7.11.2 a pav. NASA / http://www.nasa.gov/centers/jpl/missions/keck.html
7.11.3 pav. STScI / NASA / courtesy of nasaimages.org
7.11.4 pav. Molėtų astronomijos observatorijos archyvas / Sauliaus Lovčiko nuotrauka
Džeimso Klarko Maksvelo portretas / G. J. Stodart graviūra / Nuotrauka Fergus of Greenock / *The Life of James Clerk Maxwell*, by Lewis Campbell and William Garnett / http://www.jcmax.com/maxwell2.html
Heinricho Herco portretas / Library of Congress. Motion Picture, Broadcasting and Recorded Sound Division. Washington, D. C. 20540 USA / ID berlp 12030108 / http://memory.loc.gov/cgi-bin/query
Olo Remerio portretas / J P Trap, Berømte danske mænd og kvinder / http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ole_roemer.jpg
Dominiko Arago portretas / The Warner Library (1917) / the Edgar Fahs Smith collection / http://dewey.library.upenn.edu/sceti/smith/imagedetail.cfm?PictureID=19&position=6&keywords=arago&subcoll=
Žano Fuko portretas / http://en.wikipedia.org/wiki/File:Foucault.jpg
Renė Dekarto portretas / Library of Congress Prints and Photographs Division Washington / LC-USZ62-61365 / http://hdl.loc.gov/loc.pnp/cph.3b09041
8.3.7 pav. www.shutterstock.com Image ID: 3437768 © pansy
Tomo Jango portretas / Shuster, Arthur and Arthur E. Shipley. Britain's Heritage of Science. London: Constable & Co. Ltd., 1917 / http://www.marcdatabase.com/~lemur/lemur.com/gallery-of-antiquarian-technology/worthies/
Jozefo Fraunhoferio portretas / „Die großen Deutschen im Bilde" (1936) by Michael Schönitzer / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Joseph_v_Fraunhofer.jpg
8.9.4 a pav. Nevit Dilmen nuotrauka / pagal GFDL ir Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0 licenciją / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plastic_Protractor_Polarized_05375.jpg
8.9.4 b pav. Scott Bauer nuotrauka / United States Department of Agriculture http://www.ars.usda.gov/is/graphics/photos/k7245-1.htm
8.10.6 pav. Ulf Seifert nuotrauka / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Newton_rings.jpg
9.6.6 a pav. www.shutterstock.com Image ID: 3969205 © Otmar Smit
9.6.6 b pav. www.shutterstock.com Image ID: 16544965 © EugeneF
9.6.6 c pav. www.shutterstock.com Image ID: 35123302 © Dgrilla
Džozefo Džono Tomsono portretas / GWS - The Great War: The Standard History of the All Europe Conflict (volume four) edited by H. W. Wilson and J. A. Hammerton (Amalgamated Press, London 1915) / http://www.firstworldwar.com/photos/misc2.htm
Ernesto Rezerfordo portretas / Library of Congress Prints and Photographs Division Washington / George Grantham Bain Collection / LC-DIG-ggbain-36570
Nilso Boro portretas / Library of Congress Prints and Photographs Division Washington / George Grantham Bain Collection / LC-DIG-ggbain-35303
10.3.7 pav. © Charles O'Rear/CORBIS
Deniso Gaboro portretas / http://www.tamu-commerce.edu/physics/links/famous.html
Karlo Andersono portretas / LBNL archives / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carl_anderson.1937.jpg

10.4.4 a pav. © CERN / CERN-AC-0504028 / Maximilien Brice nuotrauka
10.4.4 b pav. © CERN / CERN-AC-8510776
Peterio Higso portretas / © CERN / CERN-GE-0804049 01 / Claudia Marcelloni nuotrauka
Polio Dirako portretas / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dirac_4.jpg
Anri Bekerelio portretas / Library of Congress's Prints and Photographs Division / LC-USZ62-102506 / http://hdl.loc.gov/loc.pnp/cph.3c02506
Marijos Sklodovskos-Kiuri ir Pjero Kiuri nuotrauka / © Underwood & Underwood/CORBIS
Oto Hano portretas / Eric Findlay nuotrauka / pagal Creative Commons Attribution ShareAlike 3. licenciją / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Otto_Hahn_portrait.jpg
Lizės Meitner portretas / Shy Lise the doctoral candidate, 1906, Vienna / Courtesy Master and Fellows of Churchill College, Cambridge, England
Enriko Fermio portretas / National Archives and Records Administration / ARC Identifier 558578 / Department of Energy. Office of Public Affairs
10.12.1 pav. © Andrius Ufartas / UAB „Baltijos fotografijos linija" / www.fotobankas.lt
10.12.4 a pav. NRC / http://www.nrc.gov/
10.12.4 b pav. © Tim Wright/CORBIS
10.12.6 pav. Photo courtesy of National Nuclear Security Administration / Nevada Site Office / http://www.nv.doe.gov/library/photos/photodetails.aspx?ID=1047
10.13.1 pav. © Peter Ginter/Science Faction/CORBIS
10.13.2 pav. U.S. Department of Energy / http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/early_bomb_design.htm
10.14.6 pav. www.shutterstock.com Image ID: 29407045 © Sergey Kamshylin
10.15.1 a pav. Eigenes Werk nuotrauka / pagal GFDL ir Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0 licenciją / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gundremmingen_Nuclear_Power_Plant.jpg
10.15.1 b pav. www.shutterstock.com Image ID: 28572508 © Petr Student
10.15.1 c pav. www.shutterstock.com Image ID: 17423446 © Martin D. Vonka
10.15.2 pav. United States Department of Energy / http://www.hanford.gov/gallery/?gallery=1
11.1.1 pav. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planispherical_astrolabe_mg_7095.jpg / Wikimedia Commons naudotojas Rama / pagal CeCILL licenciją
11.1.2 pav. © European Southern Observatory (ESO) / http://www.eso.org/gallery/v/ESOPIA/Stars/phot-02a-01.tif.html
11.1.3 pav. NASA / ESA/JHU/R.Sankrit & W.Blair
11.2.2 pav. NASA / JPL-Caltech
11.2.3 pav. NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington
11.2.4 pav. NASA/JPL / ID PIA00104
11.2.5 pav. Jan Herold nuotrauka http://en.wikipedia.org/wiki/File:Venustransit_2004-06-08_07-44.jpg / pagal GFDL ir Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0 licenciją
11.2.6 pav. NASA / http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery/photogallery-mars.html
11.2.7 a pav. NASA / JPL / Space Science Institute / ID PIA04866
11.2.7 b pav. NASA / ESA / M. Wong ir I. de Pater (University of California, Berkeley)
11.2.8 pav. NASA / JPL / Space Science Institute / ID PIA06193
11.2.9 pav. NASA / JPL
11.2.10 pav. NASA / JPL/Voyager mission
11.2.11 pav. NASA / JPL / ID PIA00046
11.2.12 pav. NASA / Eliot Young (*Southwest Research Institute)*
11.3.2 a pav. www.shutterstock.com Image ID: 25614778 © Iakov Kalinin
11.3.2 b pav. www.shutterstock.com Image ID: 19124629 © Pichugin Dmitry
11.3.2 c pav. www.shutterstock.com Image ID: 18262771 © Alessio Ponti
11.3.3 pav. www.shutterstock.com Image ID: 23070508 © RedTC
11.3.4 pav. www.shutterstock.com Image ID: 5493400 © juliengrondin
11.3.5 pav. www.shutterstock.com Image ID: 6318328 © ollirg
11.3.6 pav. © Audrius Bagdonas / UAB „Baltijos fotografijos linija"/ www.fotobankas.lt
11.4.1 pav. Luc Viatour / www.lucnix.be
11.4.2 pav. NASA Apollo / Johnson Space Center / AS10-32-4823
11.4.3 pav. NASA / http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/moon_landing_map.jpg

11.4.6 pav. Ilmari Karonen nuotrauka / http://lt.wikipedia.org/wiki/Vaizdas: Earthshine_Karonen.jpg / pagal Creative Commons Attribution ShareAlike licenciją
11.5.2 pav. NASA / http://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/html/object_page/nea_19970627_mos.html
11.5.3 pav. E. Kolmhofer, H. Raab; Johannes-Kepler-Observatory, Linz, Austria (http://www.sternwarte.at) / pagal GFDL ir Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0 licenciją / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comet_Hale-Bopp_1995O1.jpg
11.5.4 pav. Oliver Stein nuotrauka / pagal GFDL ir Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0 licenciją / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comet-Neat-Messier-44.jpeg
11.5.8 pav. S. Molau ir P. Jenniskens / NASA Ames Research Center
11.5.9 pav. NASA / JSC / JPL / Lunar Planetary Institute / ID PIA05759
11.5.10 pav. www.shutterstock.com Image ID: 9833152 © Jeffrey M. Frank
11.6.1 a pav. Elvio Zovės nuotrauka
11.6.1 b pav. Roberto Mura nuotrauka / http://commons.wikimedia.org/wiki/File:ScoCen.jpg
11.6.3 pav. Hinode JAXA / NASA / PPARC
11.6.4 pav. Royal Swedish Academy of Sciences / http://www.solarphysics.kva.se/NatureNov2002/
11.6.6 pav. Luc Viatour / www.lucnix.be
11.6.7 pav. SOHO (ESA & NASA)
11.8.2 pav. Casey Reed / NASA
11.8.4 pav. NASA, ESA, J. Hester and A. Loll (Arizona State University)
11.8.5 pav. NASA/CXC/ASU/J. Hester et al
11.9.1 pav. NASA/CXC/ASU/J. Hester et al
11.9.3 pav. Martin Baessgen nuotrauka / pagal Creative Commons Attribution ShareAlike 2.5 licenciją
11.9.7 pav. © European Southern Observatory (ESO) / http://www.eso.org/gallery/v/ESOPIA/Stars/phot-18b-02.jpg.html
11.9.8 pav. NASA, ESA ir H.E. Bond (STScI)
11.10.5 pav. Jimmy Westlake / NASA
11.11.1 pav. NASA / JPL-Caltech / S. Stolovy (SSC/Caltech)
11.11.4 pav. NASA, ESA ir AURA/Caltech
11.11.5 pav. NASA, the Hubble Heritage Team, (STScI/AURA) / ID GPN-2000-000930
11.11.6 pav. © European Southern Observatory (ESO) / http://www.eso.org/gallery/v/ESOPIA/Nebulae/phot-02a-02.tif.html
11.11.8 pav. NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) ir the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team
11.11.9 pav. NASA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
11.11.10 pav. NASA, ESA, G. Bacon (STScI)
11.11.11 pav. NASA, ESA ir the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
11.12.1 pav. Nick Risinger / NASA / JPL-Caltech / R. Hurt / NASA ir European Space Agency
11.12.2 pav. © European Southern Observatory (ESO) / http://www.eso.org/gallery/v/ESOPIA/Galaxies/phot-15f-01-hires.jpg.html
11.12.3 pav. © ESO / S. Brunier / http://www.eso.org/gallery/v/ESOPIA/Galaxies/B01.tif.html
11.12.4 pav. © European Southern Observatory (ESO) / http://www.eso.org/gallery/v/ESOPIA/Galaxies/phot-05a-00.tif.html
11.12.5 pav. NASA / JPL-Caltech
11.12.6 pav. © European Southern Observatory (ESO) / http://www.eso.org/gallery/v/ESOPIA/Galaxies/phot-04a-03-hires.jpg.html
11.13.2 pav. NASA Goddard Space Flight Center / COBE Science Working Group
11.13.3 pav. NASA, ESA ir the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
Jurijaus Gagarino portretas / Davide De Martin / Courtesy NASA
11.13.4 pav. NASA / Johnson Space Center / S69-31739
11.13.5 pav. NASA / AS11-40-5903
11.13.6 pav. NASA
11.13.7 a pav. NASA / ID KSC-00PP-0219
11.13.7 b pav. NASA / Tony Landis / ID ED08-0306-09

Dalykinė ir pavardžių rodyklė

Tai – antroji fizikos vadovėlio XII klasei knyga, skiriama mokiniams, kurie pasirinko išplėstinį fizikos kursą. Joje pateikiami šie skyriai: geometrinė optika, banginė optika, kvantinė optika, atomo ir branduolio fizika, astronomija. Kiekvienas skyrius baigiamas pažintine tema. Ji papildo skyriaus medžiagą, susieja ją su praktine patirtimi, artimiausioje aplinkoje vykstančiais reiškiniais, mokslo ir technikos pažanga.

Knygos pabaigoje pateikiami du laboratoriniai darbai.

ISBN 978-5-430-05444-1

